MEDDELANDEN
FRÅN LUNDS UNIVERSITETS GEOGRAFISKA INSTITUTION
AVHANDLINGAR LXXII

KARST

EN STUDIE AV ARTFJÄLLETS KARSTOMRÅDE SAMT JÄMFÖRANDE KORROSIONSANALYSER FRÅN VÄSTSPETSBERGEN OCH TJECKOSLOVAKIEN

AV

ULF HELLDÉN

1974

MEDDELANDEN FRÅN LUNDS UNIVERSITETS
GEOGRAFISKA INSTITUTION.

Serie avhandlinar.

I. Herman Richter: Skånes karta från mitten av 1500-talet till omkring 1700. Bidrag till en historisk-kartografisk undersökning (1929).
II. Josef Westin: Kulturgeografiska studier inom Nätra-, Näske- och Utbyåarnas flodområden samt angränsande kusttrakter. (1930).
III. Herman Richter och Wilhelm Norlind: Orbis Arctoi Nova et Accurata Delineatio Auctore Andrea Bureo Sueco 1626. (1936).
IV. Sven Björnsson: Sommen-Åsundenområdet. En geomorfologisk studie. (1937).
V. Arne Sandell: Tektonik och morfologi inom dalformationen med omgivande urbergsterräng. (1941).
VI. Sven Dahl: Torna och Bara. Studier i Skånes bebyggelse- och näringsgeografi före 1860. (1942).
VII. Karl Erik Bergsten: Isälvsfält kring norra Vättern. Fysisk-geografiska studier. (1943).
VIII. Carl Erik Nordenskjöld: Morfologiska studier inom övergångsområdet mellan Kalmarslätten och Tjust. (1944).
IX. Sven Björnsson: Blekinge. En studie av det blekingska kulturlandskapet. (1946).
X. Karl Erik Bergsten: Östergötlands bergslag. En geografisk studie. (1946).
XI. Tor Holmquist: Den halländska vinterfiskehamnsfrågan. (1947).
XII. Olof Ängeby: Landformerna i nordvästra Jämtland och angränsande delar av Nord-Tröndelag. (1947).
XIII. Axel Wennberg: Lantbebyggelsen i nordöstra Östergötland 1600-1875. (1947).
XIV. Lars Bjerning: Skånes jord- och stenindustri. Dess utveckling, lokalisering och betydelse ur näringsgeografisk synvinkel. (1947).
XV. Allan Weinhagen: Norbergs bergslag samt Gunnilbo och Ramnäs till omkring 1820. Studier i områdets närings- och bebyggelsegeografi. (1947).
XVI. Helge Stålberg: Smålands skogs- och träförädlingsindustrier. En näringsgeografisk studie. (1947).
XVII. Folke Lägnert: Veteodlingen i södra och mellersta Sverige. (1949).
XVIII. Yngve Nilsson: Bygd och näringsliv i norra Värmland. En kulturgeografisk studie. (1950).
XIX. Olof Ängeby: Evorsionen i recenta vattenfall. (1951).
XX. Karl Erik Bergsten: Sydsvenska födelseortsfält. (1951).
XXI. Folke Lägnert: Valmanskåren på Skånes landsbygd 1911-1948. (1952).
XXII. Olof Nordström: Relationer mellan bruk och omland i östra Småland 1750-1900. (1952).
XXIII. Arvid Bergdahl: Israndsbildningar i östra Syd- och Mellansverige med särskild hänsyn till åsarna. (1953).
XXIV. Sven E. Behrens: Morfometriska, morfogenetiska och tektoniska studier av de nordvästskånska urbergsåsarna, särskilt Kullaberg. (1953).
XXV. Torsten Hägerstrand: Innovationsförloppet ur korologisk synpunkt. (1953).

MEDDELANDEN
FRÅN LUNDS UNIVERSITETS GEOGRAFISKA INSTITUTION
AVHANDLINGAR LXXII

KARST

EN STUDIE AV ARTFJÄLLETS KARSTOMRÅDE SAMT JÄMFÖRANDE KORROSIONSANALYSER FRÅN VÄSTSPETSBERGEN OCH TJECKOSLOVAKIEN

AV

ULF HELLDÉN

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

I FÖRORD 7

II KARSTLANDSKAPET 9

II 1. DEFINITION AV ORDET KARST 9
II 2. KARSTLANDSKAPETS KARAKTÄR 10
II 3. TERMINOLOGI 11
II 4. KARSTKARAKTERISTIKA; DEFINITION OCH BESKRIVNING 11

II 4.1. Karren 11
II 4.2. Karstdalar 12
II 4.3. Karstdepressioner 13
II 4.4. Karstkällor 17
II 4.5. Grottor 17

II 5. KLASSIFICERING AV KARST 18

III DET KEMISKA VITTRINGSFÖRLOPPET I KALKSTEN .. 21

IV SAMMANDRAG ÖVER KARSTFORSKNINGENS UTVECKLING 27

IV 1. HYDROLOGI 27
IV 2. MORFOLOGI 35
IV 3. PROCESSER 37
IV 4. LITTERATUR KRING SVENSK KARSTFORSKNING 40

V ARTFJÄLLETS KARSTOMRÅDE; MORFOLGI, HYDROLOGI OCH KEMISKA PROCESSER 42

V 1. INLEDNING 42
V 2. GEOLOGI 42
V 2.1. Allmänt 42
V 2.2. Berggrundens utseende och tektonik 45
V 2.3. Berggrundens kemiska sammansättning 45
V 2.4. Kvartär utveckling 46
V 2.5. Moräntäcket 46

V 3. KLIMAT 47
V 4. MORFOLOGI 48

V 4.1. Allmänt 48
V 4.2. Depressionstyper 49
V 4.3. Karren 52

V 5. MORFOMETRI 57
V 5.1. Dräneringssystemet 58
V 5.1.1. Symboler 58
V 5.1.2. Definitioner 58
V 5.1.3. Resultat 59
V 5.1.4. Sammanfattning 60
V 5.2. Karstdepressioner 61
V 5.2.1. Symboler 61
V 5.2.2. Definitioner 63
V 5.2.3. Resultat 65
V 5.2.4. Sammanfattning 65
V 5.3. Karren 65
V 5.4. Karst i arktisk miljö kontra karst i tempererad och tropisk miljö. Diskussion och jämförelser 66

V 6. HYDROLOGI 69
V 6.1. Metodik 69
V 6.2. Vattenföring 71
V 6.3. Spårförsök 71
V 6.4. Vattnets fysikaliska egenskaper 74
V 6.5. Vattnets kemiska egenskaper 76
V 6.5.1. Kemiska analysresultat från karstvatten i skilda klimatområden. Diskussion och jämförelser 82

V 7. KORROSIONSINTENSITET 84
V 7.1. Metodik 84
V 7.2. Resultat 85
V 7.3. Korrosionsintensitetens variationer i skilda klimatområden. Diskussion och jämförelser 89

V 8. SOTSBÄCKSGROTTAN 92
V 8.1. Historik 92
V 8.2. Mätmetodik 93
V 8.3. Utbredningsmönster 97

V 8.4. Erosionsformer....103
V 8.4.1 Gångar....104
V 8.4.2. Vattenfall och forsar....107
V 8.4.3. Jättegrytor....107
V 8.4.4. Flytfasetter....107
V 8.4.5. Korrosionskolkar....110
V 8.4.6. Grottkarren....112
V 8.5. Ackumulativa former....112
V 8.5.1. Alloktont material....112
V 8.5.2. Autoktont material....113
V 8.5.2.1. Vittringsrester....113
V 8.5.2.2. Rasackumulationer....115
V 8.5.2.3. Kalciumkarbonatutfällningar....115
V 8.6. Grottans klimatförhållanden....119
V 8.7. Diskussion och jämförelser....120

V 9. SLUTSATSER....121

VI ISFJORD RADIO, VÄSTSPETSBERGEN. KORROSIONS-INTENSITETSBERÄKNINGAR....123

VI 1. INLEDNING....123
VI 2. GEOLOGI....123
VI 3. KLIMAT....123
VI 4. MORFOLOGI....124
VI 5. METODIK....125
VI 6. RESULTAT....126
VI 7. DISKUSSION OCH JÄMFÖRELSER....129
VI 8. SLUTSATSER....131

VII MORAVSKÝ KRAS, TJECKOSLOVAKIEN. KORROSIONS-INTENSITETSBERÄKNINGAR....133

VII 1. INLEDNING....133
VII 2. GEOLOGI....133
VII 3. KLIMAT....134
VII 4. MORFOLOGI OCH HYDROLOGI....134
VII 5. METODIK....137
VII 6. RESULTAT....137
VII 6.1. Vattnets kemiska och fysikaliska egenskaper....137

VII 6.2. Korrosionsintensitet.....140

VII 7. DISKUSSION OCH JÄMFÖRELSER.....146

VII 8. SLUTSATSER.....147

VIII KLIMATETS BETYDELSE FÖR KARSTLANDSKAPETS UTVECKLING. SAMMANFATTANDE DISKUSSION.....149

VIII 1. FÖRKARSTNINGSINTENSITETEN.....149

VIII 2. MORFOLOGISKA SKILLNADER.....150

VIII 3. SLUTSATSER.....151

IX SUMMARY.....152

X BILAGA 1-4.....156

Bilaga 1. Tab. 1. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Utloppet U_1.....156

-"- -"- Tab. 2. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_1.....161

-"- -"- Tab. 3. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_2.....165

Bilaga 2. Analysresultat från Artfjället december 1971. Utloppet U_1.....168

-"- 3. Tab. 1. Analysresultat från Moravský Kras våren 1972. "Tunel".....169

-"- -"- Tab. 2. Analysresultat från Moravský Kras våren 1972. "Malý výtok".....170

-"- -"- Tab. 3. Analysresultat från Moravský Kras våren 1972. "Ostrov" och "Holštejn".....171

Bilaga 4. Ordlista.....172

XI LITTERATURREFERENSER.....176

I FÖRORD

Avhandlingen utgör en studie i karst framför allt med avseende på morfologi, hydrologi och kemiska processer. Karst är ett etablerat ämne i den internationella naturgeografin och kan inordnas under begreppet klimatmorfologi. Då inte mindre än 11% av jordens landyta, enligt Ham 1962 (Sweeting 1972), består av kalksten och dolomit är det naturligt att man i många länder ägnar stor uppmärksamhet åt karstproblematiken bl.a. i avsikt att bättre kunna finna och utnyttja de grundvattenflöden som i ett välutvecklat karstlandskap ersätter den normala ytvattendräneringen. På grund av karstproblematikens komplexitet behandlas ämnet inte bara av naturgeografer utan i allt högre grad av specialister från närliggande ämnesområden inom kemin, hydrologin, klimatologin, geologin och den tillämpade speleologin. Med nedanstående arbete hoppas författaren kunna bidraga till en ökad förståelse för karstprocessernas verkan samt för hur ett karstlandskap med ett välutvecklat underjordiskt dräneringssystem kan utvecklas i ett nedisningsområde som Sverige.

Arbetet har sedan starten 1970 bedrivits vid Naturgeografiska institutionen i Lund. Institutionens chef professor Karl Erik Bergsten samt äldre och yngre forskare och tjänstemän vid institutionen har på olika sätt bidragit till att arbetet kunnat genomföras. Fil.lic. Lars Nilsson väckte 1969 författarens intresse för karstproblematiken varefter kontakter med Svenska Speleologförbundet (SSF) ledde till att undersökningar påbörjades i ett nyupptäckt karstområde i Västerbottens fjällvärld. Under tiden 1970-73 har undersökningar, förutom i det nämnda området, utförts i Tjeckoslovakien och på Spetsbergen med särskild hänsyn till de kemiska processernas intensitet och verkan i olika klimatmiljöer.

Fältarbetet i Västerbotten utfördes under perioden 1970-72 i ett karstområde beläget på Artfjället söder om sjön Över-Uman. Genom ett utomordentligt tillmötesgående och en varmt visad förståelse och gästvänlighet från Rudolf och Lillian Persson i Strimasund har arbetet underlättats i allra högsta grad. Ett varmt tack skall också framföras till fil.kand. Staffan Paulsson och författarens far Bertil Helldén utan vars bistånd detta arbete svårligen hade kunnat utföras. Ovärderlig hjälp har också lämnats av bl.a. laboratorieassistent Cecilia Håkanson, fil.kand. Katarina Håkanson, civil-

ekonom Stefan Johnsson, fil.kand. Bo Malmström och fil.kand. Owe Palmér. Ekonomiskt bidrag har erhållits från Svenska Sällskapet för Antropologi och Geografi samt från Anslaget för ogradverade forskare vid Matematisk-naturvetenskapliga fakulteten.

Fältarbetet i Tjeckoslovakien genomfördes under perioden februari-maj 1972 i samband med ett studiebesök vid Tjeckoslovakiska Vetenskapsakademiens Naturgeografiska institution i Brno. Undersökningarna kunde genomföras genom vänligt tillmötesgående av institutionens chef Dr. J. Demek och chefen för karstavdelningen, Dr. O. Štelcl. Vistelsen i Tjeckoslovakien bekostades av Svenska Ingenjörsvetenskapsakademien.

Fältarbetet på Spetsbergen utfördes delvis i samband med en doktorandkurs i periglacial geomorfologi, ledd av professor Harald Svensson, i augusti 1972 och delvis i samband med ett besök på Västspetsbergen i juli 1973. Behjälpliga vid fältarbetet var fil. kand. Owe Palmér och fil.kand. Bo Malmström. Ekonomiskt bidrag har erhållits ur Matematisk-naturvetenskapliga fakultetens fältarbetesanslag, Lunds Universitet

Renritning av kartor och figurer har utförts av Sarolta Sövény och Elesiv Herbertsson. Fotoarbeten har utförts av Rezsö Laszlo. Till nämnda och onämnda framföres ett varmt tack.

Delar av de resultat som har erhållits har, genom ekonomiskt stöd från Statens Naturvetenskapliga Forskningsråd, kunnat presenteras och diskuteras vid den 6:e Internationella Speleologkongressen i Olomouc, Tjeckoslovakien i september 1973. Utdrag av här presenterat material har tidigare publicerats av Helldén (1973 a, 1973 b, 1973 c, 1974 a).

Kartorna godkända för spridning av Rikets Allmänna Kartverk 1973-12-05, 1974-03-29.

Lund mars 1974

Ulf Helldén

II KARSTLANDSKAPET

II 1. DEFINITION AV ORDET KARST

Ordet "karst" utgör den tyska formen av det slaviska ordet "kras" eller "krš" och den italienska formen "carso". Ordet är troligen av preindoeuropeiskt ursprung och betyder naken, stenig mark. Det indoeuropeiska ordet "kar" betyder sten, klippa (Jennings 1971, Roglić 1972, Sweeting 1972). Då ett karstlandskap kännetecknas av underjordisk dränering med åtföljande ytvattenbrist är det inte förvånansvärt att människan genom tiderna i möjligaste mån försökt undvika dessa torra och steniga områden. Många områden som kunde betecknas som steniga, torra och obrukbara fick egennamn som angav dessa för människan negativa förhållanden (Helldén 1973 b). Exempel på sådana namn är karstområdena Kras och Notranskij Kras i Jugoslavien samt Moravský Kras i Tjeckoslovakien. Från att ha varit ett rent egennamn överfördes betydelsen av karst, i mitten av 1800-talet, till att beteckna ett karstlandskap vilket som helst (Sweeting 1972). Efterhand har ordet karst i den geomorfologiska litteraturen fått stå för den typ av landskap som karstlandskapet representerar.

Jennings (1971) definierar ordet karst på följande sätt: "Karst signifies terrain with distinctive characteristics of relief and drainage arising primarily from a higher degree of rock solubility in natural waters than is found elsewhere. The word is also used adjectivally to refer to rock, water, streams, caves and other features making up such a landscape".

Samma ord definieras av Sweeting (1972) enligt följande: "Karst. A solution-controlled landform type, characterized by an exclusive surface morphology, sub-surface drainage and collapse features, which is specifically developed in calcareous rock. These elements remain constant even though climate, structure and petrography generate greatly diverse surface features". Båda definierar således karst som en landskapstyp samtidigt som de antyder processernas betydelse vid utbildandet av landskapets karakteristika.

En sammanfattning av de båda definitionerna kan på svenska utformas på följande sätt: "Karst är ett sammanfattande begrepp som står för de landskapsformer och det speciella dräneringsmönster som kan utbildas, huvudsakligen genom korrosion, i karbonathal-

tig berggrund". Härvid stöds Sweetings uppfattning att karst bara kan förekomma i kalksten och/eller dolomit medan Jennings i sin definition antyder att karst kan förekomma också i andra bergartstyper.

II 2. KARSTLANDSKAPETS KARAKTÄR

Grundförutsättningen för att karst skall kunna utbildas är närvaron av cirkulerande vatten med förmåga att lösa kalkhaltig berggrund. Berggrunden vilken vanligtvis utgöres av kalksten eller dolomit bör för att maximal utveckling av karst skall kunna ske vara tät, lagrad och väl genomsatt av spricksystem. Berggrunden skall vara permeabel så tillvida att vatten via sprickor, skiktfogar etc. kan penetrera genom densamma i mer eller mindre slutna banor. En porös bergart med hög permeabilitet, t.ex. kalk, där vattnet infiltreras homogent genom hela berggrundskroppen verkar hämmande på karstutvecklingen.

Karstlandskapet kännetecknas i första hand av underjordisk dränering. Som ett resultat av att delar av berggrunden går i lösning och borttransporteras utbildas inget normalt dräneringssystem utan allt vatten sjunker ner i jorden och får underjordiskt lopp. På grund av infiltrationen kan den underjordiska och ytmorfologiska utvecklingen i stor omfattning sägas ske i vertikal riktning. I anslutning till de områden där infiltrationen är störst utbildas depressioner av olika mäktighet och karaktär varvid landskapet kan ge ett söndersplittrat och närmast kaotiskt intryck. Cvijić (1893) och Grund (1914) anför båda det oroliga och sönderdelade landskapet som typiskt för karst.

De depressioner som sönderdelar landskapet och tjänstgör som dräneringsbrunnar utgör tillsammans med erosionsrester och korrosionsfåror, s.k. karren, av olika typer det huvudsakliga inslaget i karstlandskapet. Under begreppet karren sammanföres alla typer av mindre korrosionsdrag som i form av små håligheter, utvidgade sprickor och fåror i berggrunden utbildats genom nederbördsvattnets korrosiva aktivitet ibland i samverkan med mekanisk vittring och med vittring orsakad av biologiska organismer.

II 3. TERMINOLOGI

Karakteristiskt för karstlitteraturen över hela världen är att man på de olika karstlokalerna tagit upp de lokala namn som givits källor, grottingångar, depressioner och vattendrag i olika länder. Termer från olika språk och dialekter har av olika författare givits vetenskapliga betydelser vilka ofta avviker från de ursprungliga. Trots att Internationella Speleologförbundet (UIS) i många år arbetat för en enad karstterminologi är språkförbistringen fortfarande stor. Vid 6:e Internationella Speleologkongressen i Olomouc, Tjeckoslovakien 1973, presenterade UIS´s terminologikommission ett termlexikon vilket kommer att publiceras inom de närmaste två åren. Som exempel på existerande lexikon kan nämnas "Speläologisches Fachwörterbuch" (Trimmel 1965), "Vocabulaire francais des phénoménes karstique" (Fénelon 1968) samt "A Glossary of Karst Terminology" av Monroe (1970). Då det inte finns någon anledning att öka språkförbistringen genom att söka införa karsttermer på svenska kommer i fortsättningen de etablerade termerna i den engelskspråkiga litteraturen att användas (Monroe 1972, Sweeting 1972). Där så har visat sig möjligt har fackuttrycken fritt översatts till svenska. En ordlista över de vanligast förekommande uttrycken ges i slutet av avhandlingen (bilaga 4).

II 4. KARSTKARAKTERISTIKA; DEFINITION OCH BESKRIVNING

II 4.1. Karren

Alla mikroformer i form av håligheter, sprickor och fåror utbildade eller omformade i ett karstlandskap genom yt- och nederbördsvattnets korrosiva aktivitet ibland i samverkan med mekaninsk vittring och/eller biologisk aktivitet går i den internationella litteraturen under samlingsnamnet "karren" (Ty) eller "lapiés" (Fr). Storleken varierar vanligen från några mm upp till några meter. Karren kan i undantagsfall uppnå en längd på 15-20 meter. Ett av de mer kända arbetena över karren presenterades av Cvijić (1924) vilken betonade betydelsen av berggrundens mikrotektonik för utbildandet. De huvudfaktorer som påverkar utbildandet av karren har sammanfattats av Sweeting (1972):

a) De kemiska reaktioner som är verksamma vid korrosionen har enligt Bögli (1960) olika verkningar och ger upphov till olika typer av karren.

b) Mängden och typen av nederbörd.
c) Kalkstenens fysikaliska och kemiska egenskaper.
d) Kalkstenshällarnas stupning.
e) Typen eller frånvaron av vegetationstäcke, jord, mikrobiologiska organismer etc.
f) Paleoklimatet.

På grundval av de kemiska processernas förlopp har Bögli (1960) gjort en genetisk indelning av karrenformerna vilken omfattar sex huvudgrupper, vilka i sin tur kan indelas i inte mindre än 16 typer. Därtill kommer 5 typer av komplex karaktär. Av huvudgrupperna kan nämnas:

I. Fria karren vilka utbildas av vatten som flyter obehindrat över kalkstensytan. Humus och jord saknas (Rillenkarren, Trittkarren, Rinnenkarren etc.).

II. Halvfria karren är utbildade på hällar vilka delvis är täckta med jord och vegetation. Även karrenbildningarna är helt eller delvis fyllda med jord (Kamenitza, Hohlkarren etc.).

III. Täckt karren är utbildad under ett jordtäcke (geologische Orgeln, Rundkarren etc.).

IV. Grottkarren är utbildade i grottor (Fliessfazetten, Deckenkarren etc.).

Bland de komplexa formerna kan nämnas Spitzkarren och Karrenfeldern. Karren i någon form förekommer i alla typer av karstlandskap.

II 4.2. Karstdalar

Cvijić introducerade termen karstdal (Karsttal) redan 1893. Han indelade karstdalarna i säckdalar (Sacktäler, sack valleys, pocket valleys), blinda dalar (blinde Täler, blind valleys), halvblinda dalar (halbblinde Täler, semi-blind eller half-blind valleys) och torrdalar (trockene Täler, dry valleys). Senare infördes också termen "allogenic" eller "allochtonous valleys" av Cvijić (Roglić 1964). Cvijic karstdalsklassificering är fortfarande giltig.

a) Alloktona dalar är canyonliknande och utbildade av vattendrag, som har sina källor i den impermeabla berggrund som omger karstområdet, och skär genom hela karstområdet. De är ständigt vattenförande.
b) Blinda dalar är vattenförande dalar vilka, i allmänhet strax

efter det att de nått kalkstensgränsen, slutar blint då vattnet slukas och får ett underjordiskt lopp.

c) Halvblinda dalar slukar normalt sitt vatten i en bestämd lokal. Under högvatten kan emellertid vattnet rinna vidare, på grund av att det underjordiska dräneringssystemets kapacitet är otillräcklig, för att slutligen slukas helt i ett blint dalslut. En halvblind dal har således två delar; en del som slutar blint vid ett eller flera sluk och nedströms från det första slukområdet följer en mindre dal vilken bara för vatten under högvatten och normalt också slutar blint. De blinda och halvblinda dalarna slutar vanligen med en vertikal vägg i vars nedre del en grotta finns utbildad där vattnet slukas och får ett underjordiskt lopp.

d) Säckdalar kan sägas vara motsatsen till blinda dalar och utbildas i samband med de karstkällor som uppträder inom ett karstområde. I stället för att sluta blint börjar de blint; "such a valley has a cirque-like, sack-shaped valley head" Cvijić (1893).

e) Torrdalar kallas de dalar som saknar vatten eller i vilka vatten bara uppträder temporärt. Torrdalen är förmodligen den vanligaste daltypen i karst och ger en uppfattning om de dräneringsförhållanden som tidigare rått inom ett karstområde.

Huruvida fluvialt utbildade dalar i ett karstlandskap kan betecknas som karstformer eller inte har diskuterats i litteraturen. Eftersom de s.k. karstdalarna inte är utbildade enbart genom karstprocesser utan genom fluviatil erosion anser Roglić (1956, 1964) inte dessa vara typiska för ett "äkta" karstlandskap. Han föreslår termen "fluviokarst" för karstlandskap som kännetecknas av förekomsten av karstdalar.

II 4.3. Karstdepressioner

Doliner är slutna depressioner med en diameter som vanligtvis överstiger djupet. Djupet kan variera från några dm upp till ett hundratal meter medan diametern kan variera från någon meter upp till ett tusental meter.

Termen introducerades i mitten av 1800-talet av österrikiska geologer. "Dolina" betyder på serbokratiska dal eller hål (Sweeting 1972). En mängd klassificeringar av doliner har presenterats i lit-

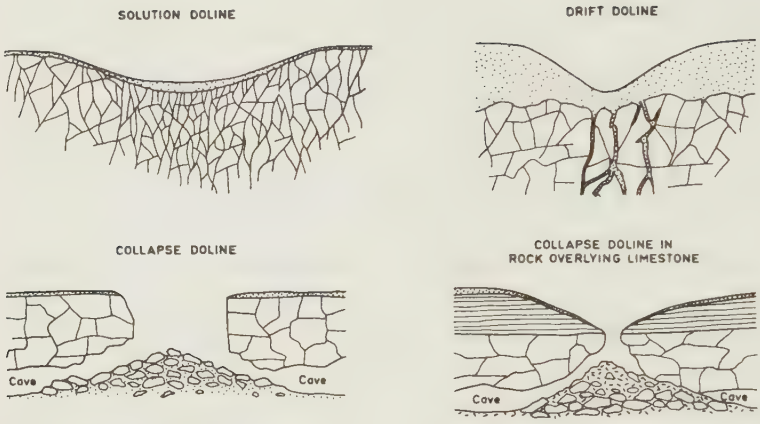


Fig.1. Dolintyper.
Types of doline (efter Williams 1971).

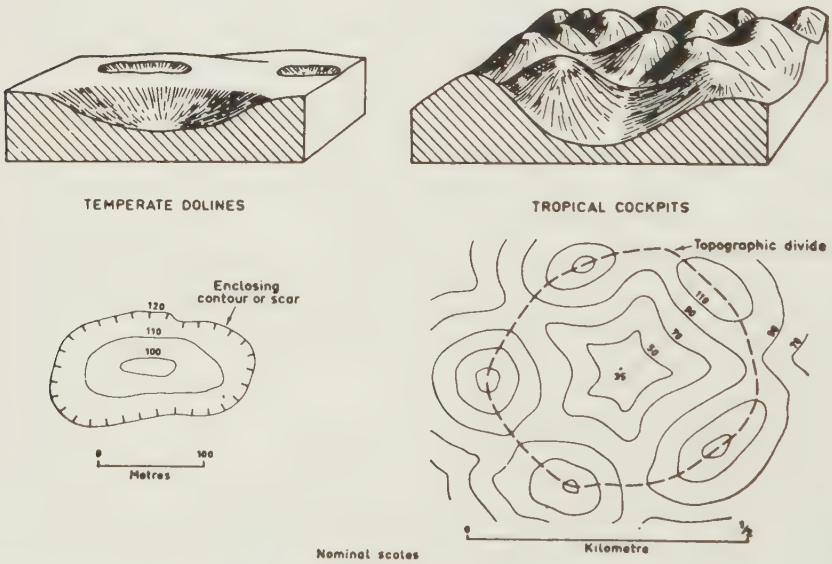


Fig.2. Avgränsning av tempererade och tropiska karstdepressioner.
Delemitation of temperate and tropical closed depressions (efter Williams 1971).

teraturen av vilka kan nämnas Cvijić (1893), Cramer (1941) och Williams (1969, 1971). Nedanstående typindelning grundar sig på Williams (1971) och Sweetings (1972) dolinklassificering (fig. 1).

a) Lösningsdolin. Vatten infiltreras via sprickor i berggrunden varvid dessa vidgas genom kemisk lösning. Genom transport av material från markytan uppkommer sättningar och markytan sänks varvid en depression utbildas. I botten på depressionen ansamlas residualt och alluvialt material. I alpina områden utgör snön en viktig faktor vid utbildandet av doliner. Genom en kombination av mekanisk vittring, framförallt frostvittring, och kemisk vittring kan doliner, helt eller delvis fyllda med snö, med nästan vertikala väggar utbildas. Dessa går under namnet snödoliner eller kotlici. Två eller flera doliner kan också växa ihop till en större depression, vilken kallas "uvala".

b) Alluvial dolin. Där kalksten är täckt med lösa avlagringar och lösning av berggrunden äger rum kan alluviala doliner utbildas i form av kraterliknande hål genom att delar av de lösa avlagringarna transporteras ned i underliggande håligheter varvid sättningar och ras kan uppstå.

c) Instörtningsdolin (collapse doline). Denna typ utbildas genom instörtning av underliggande grottsystem. Instörtningsdoliner kan utbildas i s.k. täckt karst (unterirdische Karst, covered karst). Den täckta karsten uppkommer genom att lösning av kalksten äger rum under ett lager av någon främmande bergart som t.ex. skiffer eller sandsten. Då den överlagrade bergarten störtar in som en följd av de på djupet verkande karstprocesserna bildas kraterliknande doliner vilka går under beteckningen "solution subsidence". Processen som ger upphov till denna morfologi kallas suffosion.

I tropikerna ersätts de mer eller mindre cirkulära dolinerna av oregelbundna stjärnliknande depressioner vilka går under benämningen "cockpits" (fig. 2). De regelbundna kullar som upptar ytan mellan depressionerna är kända som "Kegeln" eller "cones" medan formerna tillsammans utgör de viktigaste karakteristika för "Kegelkarst" även kallat "cone karst" eller "cockpit karst". Motsvarigheten till uvalas är i tropikerna s.k. "glades", vilka således består av två eller flera sammanväxta cockpits.

Polje. Med polje avser man på de flesta slaviska språk ett odlings-

bart fält. Denna flacka yta kan vara utbildad på vilken berggrund som helst och behöver inte vara knuten till kalksten (Sweeting 1972).

Med polje avses inom karstmorfologin en stor depression vars mycket flacka botten oftast är mer eller mindre täckt med alluvium. Sidorna stupar vanligen mer än 30°. Längden kan variera mellan 2 km och över 60 km och de flesta är ovala eller utdragna i en riktning. En polje vilken uteslutande dräneras subterrant är känd som en sluten polje (closed polje) medan en polje som åtminstone delvis dräneras via en flod går under beteckningen öppen polje (open polje). På botten av en polje uppträder ofta små isolerade erosionsrester i kalksten vilka reser sig över den plana ytan. Dessa har fått namnet "hums" efter byn Hum i Popovo polje i Jugoslavien.

En vanlig företeelse bland Jugoslaviens poljes är ständigt återkommande översvämningar orsakade av att det underjordiska dräneringssystemet inte alltid har tillräcklig kapacitet för att föra bort de stora nederbördsmängderna. I samband med översvämningarna, då sluk tillfälligt kan tjänstgöra som källor, verkar poljen som en sedimentationsbassäng varvid sluk och doliner mer eller mindre kan täppas igen av lösmaterial vilket förlänger översvämningens varaktighet. I stället för en vertikal korrosion erhålles i samband härmed en marginell erosion vilken vidgar poljen (Roglić 1954, 1956, 1960, 1972 och Gams 1969 a, 1973). Hydrologi, genes och klassificering av poljes har behandlats ingående av bl.a. Lehmann 1932, Lehmann 1954, 1959, Kayser 1955, 1973, Lois 1956, Büdel 1973 och Bögli 1973. Poljes samband med tektoniska dislokationer uppmärksammades redan 1893 av Cvijić. Sweeting (1972) ger en sammanfattning av den nuvarande uppfattningen om poljes: "Sensu stricto, poljes are plains of accumulation within depressions in karst regions, and introduce a foreign or non-karstic element into the karst".

Sluk. De håligheter eller sprickor i vilka ytvattenströmmar försvinner underjordiskt benämns i den engelska litteraturen för "swallow holes" eller "swallets" medan samma fenomen i den amerikanska litteraturen benämnes "water sink" eller "stream sink". Cvijić (1924) använde sig av termen "ponor" för samma fenomen. Med den senare termen avses oftast ett sluk vilket utgör ingången till ett grottsystem.

II 4.4. Karstkällor

På grund av karstens natur är det naturligt att karstkällorna tillhör de största i världen. Som exempel kan nämnas källan Timavo i Jugoslavien vilken kommer upp i en vattenföring på 2 300 000 m^3/dygn (Sweeting 1972).

Trombe (1952) skiljer på två typer av källor nämligen "exsurgences" och "resurgences" där de förra matas med infiltrationsvatten medan de senare för upp vatten till ytan som gått in i den subterrana cirkulationen via sluk. Det kan emellertid vara svårt att åtskilja de båda typerna eftersom även den senare källtypen i viss mån alltid är beroende av infiltrationsvatten. Man skiljer också på källor med artesiskt och fritt flöde. Bland andra typer av källor kan nämnas pulserande sådana vilka på grund av oregelbundna passager och sifoner innanför själva källan avger vatten i pulser (Trombe 1952). Submarina källor vilka kan avge både sött och bräckt vatten har beskrivits av bl.a. Lehmann (1932) och Trombe (1952). Längs adriatiska kusten är dessa källor kända under namnet "vruljas".

II 4.5. Grottor

Trots att studiet av grottor i dag utvecklats till en egen vetenskap kan man svårligen studera karst utan att också beröra speleologin eftersom grottorna utgör det mest påtagliga resultatet av grundvattnets verkningar i kalksten. Utvecklingen av speleologin har i stort sett följt utvecklingen av forskningen om grundvattnet i olika karstområden vilken återges i kapitlet om karstforskningens utveckling.

Någon internationellt accepterad vetenskaplig definition på grotta finns inte. Oxford Dictionary definierar en grotta som " an underground hollow usually with an horizontal opening". Bretz (1956) ifrågasätter om det någonsin kommer att bli möjligt att definiera en grotta så att alla blir tillfredsställda. "..... nor is it possible that everyone will ever agree on a definition of a cave. Is a rock shelter a cave? Is a natural bridge a cave? Is a hole that can barely be crawled into for only a few feet a cave? Is it a cave if one´s light shows an opening into which one cannot force his way?" Bonniers lexikon (1966) upplyser om att en grotta är ett

större hålrum vanligen i fast berg.

Grottors genes och morfologi kommer att behandlas i kapitlet om Sotsbäcksgrottan. En del av de faktorer som påverkar en grottas morfologi har sammanfattats av Sweeting (1972) av vilka följande kan nämnas; formen av de ursprungliga kapillärer i vilka vattnet börjar cirkulera; berggrundens petrologiska och kemiska karaktär; berggrundens struktur såsom stupning, sprickor, förkastningar, veck, veckaxlar etc.; typ och storlek av det vattenflöde som passerar genom gångsystemen; typen av de karstprocesser som är i verksamhet; den regionala morfologin; grottans utvecklingshistoria samt variationer i klimat och paleoklimat.

Då det knappast lär finnas två grottor som är likadana är det naturligtvis mycket svårt att presentera en giltig grottklassificering. De faktorer som påverkar grott-utbildningen är många och varierande. Försök att klassificera grottor på grundval av den typ av vatten som utbildat dem har gjorts av Sweeting (1972) som skiljer på vadösa grottor, freatiska grottor och grottor utbildade i grundvattenytan. En sådan klassificering är emellertid vansklig då de flesta grottor uppvisar både vadösa och freatiska former. (Se vidare kapitlet om karstforskningens utveckling).

Som exempel på hur stora grottsystem kan bli kan nämnas Europas längsta grottsystem Hölloch i Schweitz med en fram till 1970 uppmätt totallängd på 109,2 km (Bögli 1970) och världens största kända grottsystem The Flint-Mammoth Cave i Kentucky, USA, med en fram till augusti 1973 uppmätt framkomlig längd på 252,5 km (The Cave Research Foundation 1973).

II 5. KLASSIFICERING AV KARST

Olika försök att klassificera karst har gjorts sedan början på 1900-talet. Grund (1914) använder sig av termerna "karst" och "halbkarst" medan Cvijić i sina arbeten talar om "holokarst", "merokarst" och "transitional karst". Med holokarst avses perfekt utvecklad karst både med avseende på morfologi och underjordisk dränering. Holokarsten är enligt Cvijić utbildad i så massiv och ren kalksten, vilken är genomsatt med sprickor, att dess utveckling kan fortskrida obehindrat ända ner till underlagrande impermeabla lager oberoende av havsytans läge. Ytdränering saknas helt och pol-

jes finns utbildade. Merokarsten är inte lika fulländad. Kalkstenen är tunn och mindre ren. Ytdränering och mekanisk erosion förekommer samtidigt som karsten vanligen är täckt med jord. Karren och doliner förekommer sparsamt medan poljes saknas helt. Sluk och grottor är emellertid vanliga. Transitional karst intar en mellanställning mellan holokarst och merokarst dock med en viss dragning åt holokarsten. På grundval om karstformer utbildats under ett jordtäcke eller på naken kalksten skiljer Sawicki (1909) mellan täckt karst och naken karst. På grundval av klimatmorfologins utveckling under 40-talet presenterade Birot (Lehmann et al. 1954) en klassificering som grundade sig på tanken att karst utvecklas på olika sätt i olika klimatområden: karst i 1) Climat périglaciaire á permafrost, 2) Climat océanique frais et climate periglaciaire sans permafrost, 3) Climat océanique doux, 4) Climat plus ou moins aride, 5) Climat chaud et humide. Denna klassindelning har i hög grad influerat de karstarbeten som presenterats under 50- och 60-talen.

Gvozdeckij (1965) vilken påpekat att karstutvecklingen inte bara är beroende av klimatfaktorer utan också av geologisk struktur gör följande klassificering av karst i Sovjetunionen: 1) Begravd karst (buried karst) är ett karstlandskap vilket är helt täckt av överliggande berg eller jordarter och kan på intet sätt manifesteras på markytan utan enbart genom geofysikaliska metoder, 2) Täckt karst (covered karst) finns utbildad där kalkstenen är täckt med olösliga geologiska formationer vilka inte står i någon genetisk relation till den underliggande kalkstenen, 3) Jordtäckt karst (soddy karst, soil-covered karst) utbildas då kalkstenen är täckt med jord och terra rossa utbildade på platsen, 4) Naken karst (naked karst) är en motsvarighet till holokarst, 5) Tropisk karst (cone karst, tropical karst) förekommer bara i relikt form, 6) Permafrost karst (karst related to permafrost).

Som tidigare nämnts föreslår Roglić (1956, 1964) termen "fluviokarst" för karstlandskap vars morfologi i hög grad påverkats av fluviatil verksamhet. Eftersom man ännu inte känner till hur alla de faktorer som medverkar vid utbildandet av ett karstlandskap verkar eller hur paleoklimatologiska betingelser påverkat morfologin, är det givetvis omöjligt att komma fram till en perfekt landskapsklassificering. Panoš (1965) påpekar att en morfogenetisk klassi-

ficering av karstlandskapet vilken enbart grundar sig på de olika klimattyperna i världen på intet sätt är övertygande. Medveten om svårigheterna att konstruera en giltig karstklassificering, då varje karstområde är unikt, presenterar Sweeting (1972) en sådan grundad på den dominerande process och/eller klimatologiska regim som gett landskapet dess karaktär: 1) Sann karst (true karst, holokarst), 2) Fluviokarst, 3) Glaciokarst och snökarst (glacio-nival karst) inklusive permafrost (högarktisk) karst, 4) Tropisk karst, 5) Arid och semiarid karst. Var och en av dessa klasser kan sedan på strukturell basis indelas i bergskarst (high mountain karst), där berggrunden vanligen är störd av veckningar och tektoniska dislokationer, och låglandskarst (lowland karst) där kalkstenen oftast är mer eller mindre ostörd och horisontellt lagrad. Därtill kommer de karsttyper som presenterats av Gvozdeckij (1965) samt fossil karst, syngenetisk karst, pseudo karst och termal karst. Fossil karst, eller paleokarst som den också kallas, utbildad under tidigare geologiska perioder och under förhållanden som inte längre råder kan indelas i relikt karst och frilagd karst (exhumed karst). Med den förra typen avses fossil karst som aldrig överlagrats av senare geologiska formationer och med den senare fossil karst som täckts av senare geologiska formationer men blottlagts genom erosion. Med syngenetisk karst avses karst som utbildas samtidigt med kalkstenen. Denna landskapstyp är viktig i kustområden där korall eller karbonathaltig sand konsolideras och där nederbörden är tillräcklig för att orsaka korrosionsfenomen. Pseudo karst är det namn som givits sådana karstliknande fenomen som uppkommit på annat sätt än genom karstprocessers verkan. Så har t.ex. karrenliknande fåror med en längd av upp till 6 m och ett djup upp till 0,9 m utbildade i mikrogranodiorit i Sarawak beskrivits av Wilford et al. (1966) medan Sweeting (1972) kunnat konstatera förekomsten av både karren och dolinliknande fenomen i granit i Swaziland. Som en form av pseudo karst kan också termokarsten, vilken uppkommer genom en differentierad smältning av is under markytan, beskrivas. Termal karst, till skillnad från termokarst, är karst utbildad eller starkt påverkad av termalt mineraliserat vatten.

III DET KEMISKA VITTRINGSFÖRLOPPET I KALKSTEN

En av de viktigaste processerna vid utbildandet av karst är den kemiska lösningen av kalksten vilken vanligtvis sammanfattas med formeln $CaCO_3 + H_2O + CO_2 \rightleftharpoons Ca(HCO_3)_2$. Litteraturen över hur kalciumkarbonat ($CaCO_3$), vatten (H_2O) och koldioxid (CO_2) reagerar med varandra är stor. Sammanfattningar i ämnet har givits av bl.a. Trombe (1952), Bögli (1956,1960), Roques (1969), Stenner (1969) och Sweeting (1972).

De reaktioner som äger rum då kolsyrehaltigt vatten reagerar med kalciumkarbonat kan skrivas på följande sätt;

$$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \qquad (1)$$

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^- \qquad (2)$$

$$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{-2} \qquad (3)$$

$$Ca^{+2} + CO_3^{-2} \rightleftharpoons CaCO_3 \qquad (4)$$

$$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^- \qquad (5)$$

$$CaHCO_3^+ \rightleftharpoons Ca^{+2} + HCO_3^- \qquad (6)$$

Samtliga reaktioner är reversibla och intimt förknippade med varandra. En förändring i en av reaktionerna ger genast upphov till förändringar i de övriga för att jämvikt skall kunna uppstå i hela reaktionskomplexet. Enligt Bögli (1960) bestäms lösningen av kalksten av fyra temperaturberoende faser.

Under den första fasen löser sig kalk direkt i vatten utan inverkan av kolsyra. De dissocierade jonerna strävar efter en jämvikt vilken bestäms av löslighetsprodukten K_c. $CaCO_3 \rightleftharpoons Ca^{+2} + CO_3^{-2}$; $[Ca^{+2}] \cdot [CO_3^{-2}] = K_c$. Vid jämvikt innehåller en liter vatten 10 mg $CaCO_3$ vid temperaturen +8,7° C. Vid temperaturen +16° C och +25° C ökar halten löst $CaCO_3$ till 13,1 mg/l respektive 14,3 mg/l. Reaktionsförloppet går mycket snabbt.

Under andra fasen reagerar den i vatten lösta koldioxiden vilken uppträder dels kemiskt löst och dels fysikaliskt löst. Vid +4° C är endast 0,7% av vattnets koldioxidhalt kemiskt löst, i form av kolsyra, medan 99,3% är fysikaliskt löst. De vätejoner som bildas vid kolsyrans dissociering (2,3) reagerar med de karbonatjoner som gått i lösning under första fasen $H^+ + CO_3^{-2} \rightleftharpoons HCO_3^-$. Den reversibla reaktionen är förskjuten åt höger. Jämvikten regleras av kolsyrans

andra dissociationskonstant K_2 och förloppet kan skrivas $[H^+] \cdot [CO_3^{-2}] \cdot [HCO_3^-]^{-1} = K_2$. Genom att karbonatjoner från den första fasen på detta sätt bindes måste dessa ersättas med nya. Detta sker genom att mer $CaCO_3$ går i lösning varvid löslighetsprodukten K_c åter kan uppnås.

I den tredje fasen omvandlas den fysikaliskt lösta koldioxiden till kolsyra och dess joner. $CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$. Denna reaktion framkallas av att jämvikten mellan fysikaliskt löst och kemiskt löst koldioxid störts under andra fasen. I och med att nya vätejoner går i lösning äger genom en kedjereaktion via andra och första fasen ytterligare lösning av $CaCO_3$ rum. Den mängd kalk som kan gå i lösning bestäms av den ursprungliga koldioxidhalten i vattnet. Denna är direkt proportionell mot produkten av det atmosfäriska koldioxidtrycket, vikten av en liter CO_2 och en temperaturberoende faktor, vars värde minskar med ökad temperatur. Vid ett genomsnittligt partialtryck på 0,0003 atmosfärer kan vid 0° C 1,01 mg CO_2/l gå i lösning medan halten sjunker till 0,45 mg/l vid en temperatur på $+25^o$ C. Med andra ord kan således 0-gradigt vatten lösa ungefär 2,4 ggr så mycket CO_2 som 25-gradigt vatten vid normalt atmosfäriskt tryck.

Den fjärde fasen gör sig gällande först när de tre föregående löpt ut, men den behärskar å andra sidan från det den träder i kraft hela det fortsatta kemiska förloppet till dess slut. För att återställa jämvikten mellan vattnets och luftens CO_2-koncentrationer diffunderar nu atmosfärens CO_2 in i vattnet och löses fysikaliskt varvid en reaktionskedja via de föregående faserna utlöses. CO_2 fortsätter att diffundera in i vattnet så länge $CaCO_3$ kan gå i lösning. Slutligen inställer sig en jämvikt mellan löst och olöst kalk vilken bestäms av löslighetsprodukten K_c. Diffusionshastiheten, vilken ökar med temperaturen, reglerar den hastighet med vilken kalciumkarbonat går i lösning under den fjärde fasen. Diffusionshastigheten är mycket låg och enligt Böglis undersökningar krävs minst ett dygn för att jämvikt skall kunna uppnås. Lösningsintensiteten, dvs. den hastighet med vilken kalkstenen går i lösning anses vara minst 1000 ggr större under de tre första faserna än under fas fyra.

På grundval av de varierande tidsförloppen som krävs för att kalciumkarbonat skall gå i lösning har Bögli indelat de fyra kemiska

faserna i tre verkningstyper (Wirkungstypen) (fig.3). Den första verkningstypen omfattar faserna ett och två med en hög kalkomsättning per sekund. Typ två omfattar fas tre medan den tredje omfattar fas fyra under vilken mest kalciumkarbonat löses. Den tid som krävs för att nå ett jämviktstillstånd är som nämnts mycket lång och kalkomsättningen per sekund är mellan 1000 och 10 000 ggr mindre än under verkningstyperna 1 och 2.

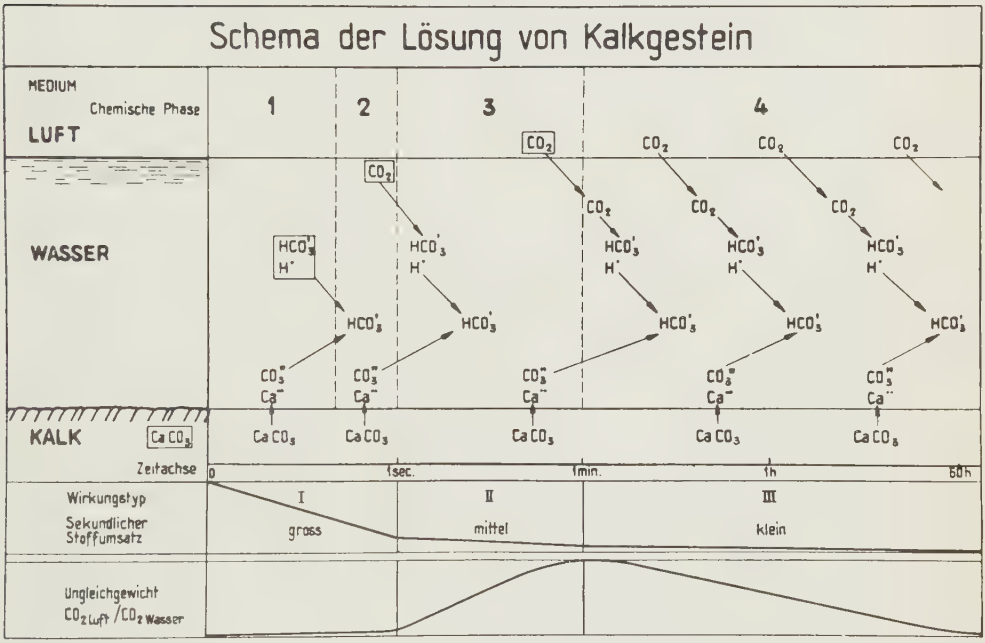


Fig.3. Lösningsförloppet i kalksten.
Scheme of solution in limestone (efter Bögli 1960).

Verkningstyp 1 är bunden till nakna kalkhällar vilka korroderas av nederbördsvatten. Den gör sig framförallt gällande i varma klimatområden eftersom mängden löst kalk ökar med temperaturen. Det morfologiska resultatet av verkningstypen är i första hand Rillenkarren.

Verkningstyp 2 ökar sin verkningsgrad med sänkt temperatur för samma koldioxidtryck, varför den anses vara mest verksam i kalla klimatområden. Reaktionshastigheten är lägre än i verkningstyp 1 och ökar med temperaturen. Den är emellertid av liten morfologisk

betydelse i jämförelse med verkningstyp 3.
Verkningstyp 3 ansvararför huvuddelen av karstformerna inom samtliga klimatområden. Den kan lösa upp till 10 ggr mer $CaCO_3$ än de båda andra verkningstyperna.

Då reaktionshastigheten ökar med temperaturen kan mer kalk lösas av vatten som rinner fram över en kalkstenshäll i ett tropiskt område än i ett kallt klimatområde, varvid också jämvikt uppnås snabbare. Arktiska och subarktiska karstområden anses därför karakteriseras av välutvecklad underjordisk karst och brist på ytkarst. På grund av de låga vattentemperaturerna hinner vattnet inte lösa tillräckligt mycket av berggrunden för att mättas innan det via sluk och doliner får ett subterrant lopp. Eftersom vattnet fortfarande är aggressivt, dvs. kan lösa mer kalksten, när det når underjorden kan korrosion ske och ett välutvecklat subterrant dräneringssystem utbildas. De tropiska och sub-tropiska karstområdena å andra sidan anses karakteriseras av stora ytformer och ett subterrant dräneringssystem vars omfattning inte till närmelsevis antar de stora dimensioner som karakteriserar de arktiska och subarktiska områdena. Tillgången på grottor är således liten och de som finns kännetecknas av mycket rikliga droppstensformationer vilka hotar att helt fylla grottorna. På grund av de höga vattentemperaturerna reagerar vattnet mycket snabbt med sin omgivning och redan innan det når underjorden har det mättats, dvs. mer kalksten kan inte lösas. Ytterligare en faktor som verkar för att mängden kalksten som på ytan kan gå i lösning är hög, trots vattnets nedsatta förmåga att lösa koldioxid, är det höga koldioxidtrycket i jordlagrens atmosfär. Då vattnet når underjorden ändras normalt omgivningens temeratur och koldioxidhalt varvid $CaCO_3$ utfälls. Man kan således säga att den tropiska karsten kännetecknas av att kalksten går i lösning på ytan och ackumuleras i underjorden medan den arktiska och sub-arktiska karsten, om man bortser från permafrostområden, kännetecknas av att den huvudsakliga korrosionen äger rum underjordiskt.

Karst i tempererade områden förmodas intaga en mellanställning mellan de två extremerna.

För att underlätta förståelsen av kommande resonemang förklaras nedan några vanliga uttryck som användes inom läran om karstprocesserna.

Fria koldioxidhalten är summan av fysikaliskt löst och kemiskt löst CO_2.
Kombinerad koldioxid är summan av den CO_2 som är bunden till vätekarbonaterna (HCO_3^-) i lösning.
pH är ett mått på vätejonkoncentrationen $[H^+]$ och definieras som $pH = -\log_{10}[H^+]$.
Kalciumhårdhet är ett uttryck för koncentrationen av lösta kalciumsalter och anges vanligen i tyska hårdhetsgrader (d^o), milliekvivalenter/l (mekv/l), mg Ca^{+2}/l p.p.m. $CaCO_3$ eller mg $CaCO_3$/l.
Magnesiumhårdhet är ett uttryck för koncentrationen av lösta magnesiumsalter och anges vanligen i mg Mg^{+2}/l eller ovan nämnda sorter.
Total hårdhet anger summan av lösta kalcium- och magnesiumsalter och uttrycks vanligen i d^o, mekv/l, p.p.m. $CaCO_3$ eller mg $CaCO_3$/l.
Alkalinitet, alkalin hårdhet (karbonathårdhet) i samband med vatten i karstområden avses koncentrationen av kalcium- och magnesiumvätekarbonat (HCO_3^-) uttryckt i sorten p.p.m. $CaCO_3$, mg $CaCO_3$/l eleler mekv/l.
Icke-alkalin hårdhet uttrycker koncentrationen av andra kalcium- och magnesiumsalter än vätekarbonaterna och kan anges omräknat till p.p.m. $CaCO_3$, mg $CaCO_3$/l eller mekv/l.
Aggressivt vatten kallas det vatten som till följd av överskott på fri CO_2 kan lösa kalciumkarbonat. Vatten som inte uppnått jämvikt benämnes aggressivt eller omättat. Aggressiviteten anges vanligen genom att man mäter fria koldioxidhalten eller vätejonkoncentrationen (pH).

1964 introducerades begreppen "Mischungskorrosion" (mixed corrosion), "Abkühlungskorrosion" (avkylningskorrosion) och "thermische Mischungskorrosion" (thermal mixed corrosion) av Bögli. Han lyckades påvisa att två vattenflöden med olika halt av kalcium som gått i lösning men som ändå är mättade, dvs. var för sig inte kan lösa mer $CaCO_3$, om de blandas återvinner sin förmåga att lösa $CaCO_3$ beroende på att fri CO_2 frigöres (Mischungskorrosion). Mättat vatten kan också återvinna sin förmåga att lösa $CaCO_3$ om vattentemperaturen sänks, varvid fri CO_2 frigöres (Abkühlungskorrosion). Thermische Mischungskorrosion innebär att om två mättade vattenflöden med samma kalciumkoncentrationer men olika vattentemperaturer blandas frigörs också i detta fall fri CO_2 och vattnet återvinner sin aggressivitet. På nämnda sätt kan således mättade vatten återvinna

sin aggressivitet och ytterligare lösning av kalksten kan ske utan att CO_2 behöver tillföras externt. Dessa typer av korrosion anses vara av mycket stor betydelse vid lösning av $CaCO_3$ i ständigt vattenfyllda zoner där mättat vatten inte kan erhålla CO_2 på något annat sätt. Många korrosionsformer utbildade i form av håligheter (fig.59), i samband med sprickor och sammangående gångar, och vanliga i de flesta karstgrottor anses vara exempel på verkningar av de nämnda processerna (Bögli 1964, 1965, 1971). Inom parentes kan nämnas att man från ryskt håll hävdat att ryssarna Buneyev och Laptev redan på 1930-talet framförde samma åsikter som 1964 presenterades av Bögli (Gvozdetsky 1973).

IV SAMMANDRAG ÖVER KARSTFORSKNINGENS UTVECKLING

Enligt Štelcl (1963) kan karstforskningen härledas ända tillbaka till år 1768 då en viss J. P. Falk efter ett besök i en tjeckoslovakisk grotta uttalade sin mening att grottans botten låg i nivå med vattenytan på en närliggande flod. Enligt Jennings (1971) och Shaw (1974) kan emellertid karstforskningen härledas ända tillbaka till 800-talet före Kristus då den assyriske konungen Salamanassar III lär ha sänt en expedition till Tigris källa för att undersöka karstkällor och grottor. Någon verklig utveckling av karstforskningen ägde emellertid inte rum förrän under andra delen av 1800-talet och början av 1900-talet.

IV 1. HYDROLOGI

1893 presenterade A. Pencks elev, den serbiske geografen J. Cvijić Das Karstphänomen, ett verk som markerar inledningen till den moderna karstforskningen. I detta verk tas den kemiska erosionens betydelse som morfologisk process upp och begrepp som dolin, karren och polje definieras. "Normala doliner" utbildades genom att vatten trängde ner i sprickor i marken och vidare ner i underliggande grottsystem. Genom att sprickorna förstorades genom kemisk erosion skapades genom transport av löst $CaCO_3$ och mindre sättningar i marken depressioner vilka han kallade doliner. Cvijić utvecklade snart en cyklisk syn på karstutvecklingen varvid han ansåg att karrenfåror kunde vidareutvecklas till doliner vilka i sin tur kunde växa samman och bilda större depressioner s.k. uvalas. Två eller flera uvalas kunde slutligen i ett moget stadium sammanväxa till en polje, den största och sista formen i landskapets åldrande (Sanders 1921, Cvijić 1924).

1903 presenterade Grund, också han elev till Penck, sitt verk Karsthydrographie vilket skulle ge upphov till en lång och häftig debatt. Grund menade att det vatten som infiltreras i kalkstenen cirkulerar i de befintliga sprickorna tills det når en underliggande grundvattenyta vilken är sammanbunden med samtliga sprickor. Grundvattnet underlagras av impermeabel berggrund. "From the sea-level landwards, there is a rising surface, below which all joints are filled with stagnant water. At this surface, the downward movement of water ceases and begins the movement in a horizontal direction towards the sea. The surface of the stagnant water is

not horizontal, but is inclined and in equilibrium with the sea-level" (Grund 1903). Grundvattenytan antogs således utgöra erosionsbasen för karsterosionen. Det vatten som vid grundvattenytan började röra sig i horisontalled mot havet kallades av Grund för karstvatten (karst water). Karstvattnet flöt så att säga ovanpå grundvattnet och dess mäktighet ansågs variera med årstid och nederbörd. Ovanför karstvattnet cirkulerade det atmosfäriska vatten som infiltrerats (fig. 4). Den morfologiska utvecklingen ansågs vara bestämd av erosionsbasen, grundvattenytan, och skedde i cykler.

Den kritik som väcktes mot Grund kan sammanfattas av de åsikter som kom till uttryck genom Katzer (1909). Han ansåg att de subterrana vattenflödena var mer eller mindre oberoende av varandra. Vattnet cirkulerade i permeabla sprickor i kalkstensmassivet ända ned till underliggande impermeabla lager oberoende av lokala erosionsbaser eller havsnivån. Existensen av grundvatten och karstvatten enligt Grunds uppfattning förnekades helt. Som bevis för sin åsikt anförde han som exempel det förhållande att submarina källor existerar på ett djup av 700 meter under havsytan. 1918 lade Cvijić fram sin uppfattning om grundvattenförhållandena i karstmassiv (Sanders 1921). Han kunde inte acceptera vare sig Grunds eller Katzers teorier utan antog att det i ett etablerat karstsystem existerar tre hydrografiska zoner:

1. The zone immediately beneath the surface is composed of channels and reservoirs which transmit water in time of storm but are usually dry.
2. The next zone is intermittently dry and wet; its caverns and channels may be flooded for considerable periods but not permanently.

Så långt är teorierna i ganska god överensstämmelse med Grunds två översta vattenzoner.

3. The lowest zone, situated immediatly above the junction with the underlying impermeable strata, has permanent streams and resevoirs which are always full of water.

Cvijić ansåg den understa vattenzonens läge och höjdvariationer vara oberoende av havsytans oscillationer. Teorin kan betraktas som en kompromiss mellan Grunds och Katzers åsikter. Cvijić tänkte sig vidare utvecklingen av karstlandskapet i fyra faser:

Fas 1. Bara en hydrografisk zon existerar. Sprickorna i berggrunden har inte hunnit vidgas nämnvärt genom kemisk erosion. På markytan förekommer fortfarande normala vattendrag. Ytkarsten är föga utvecklad. Efterhand som sprickornas vattenupptagande kapacitet ökar infiltreras allt ytvatten och de hydrografiska zonerna 1 och 2 kan utbildas.

Fas 2. De tre hydografiska zonerna finns utbildade och landskapet har antagit sitt "mogna stadium" med välutvecklade doliner, uvalas och poljes.

Fas 3. Denudationen fortgår och landskapsformerna börjar sönderfalla. Underliggande impermeabla lager eroderas fram.

Fas 4. Nästan all kalksten är borteroderad och bara erosionsrester, hums, återfinns på den blottade impermeabla berggrunden.

I USA tog karstforskningen verklig fart först på 1930-talet efter att W. M. Davis 1930 framlagt sin s.k. "två-cykel teori". Inom parentes kan nämnas att Davis 1899 tillsammans med Penck och hans studenter företog en exkursion till Bosniens och Hercegovinias karstområden. På grundval av att man kunnat konstatera källor belägna långt under havsytans nivå vid Floridas kust, på Kuba och på andra ställen förutsattes att korrosion kan äga rum under grundvattenytan (jfr. Katzer 1909). De stora amerikanska grottornas tredimensionella nätmönster, vilket starkt avviker från det dendritiska dräneringsmönster som utbildas på markytan, blinda, cirkel eller ellipsformade grottgångar med olika typer av erosionsmärken på väggar och tak talade för att de blivit utbildade under grundvattenytan och med andra ord varit helt fyllda med cirkulerande vatten. Två-cykelteorin innebär i korthet att grottor utbildades i en första fas av långsamt cirkulerande grundvatten både i och långt under grundvattenytan. Den kemiska lösning som äger rum på stort djup i grundvattnet kallar Davis för freatisk lösning (phreatic solution) och det djupt belägna grundvatten där den kemiska lösningen äger rum för freatiskt vatten. Efter en sänkning av erosionsbasen varvid även grundvattenytan och grundvattencirkulationen når större djup modifieras grottorna av vadöst vatten med vilket avses subterrant vatten vilket cirkulerar fritt, i enlighet med gravitationslagarna, ovanför den ständigt vattenmättade zonen (freatiska zonen) (fig. 5). Davis framhöll också att korrosionen var av vida större betydelse än korrasionen samt antydde att det inte nöd-

vändigtvis måste finnas ett samband mellan det underjordiska dräneringssystemets morfologi, vilket är helt beroende av den cyklisk-ka utvecklingen, och utvecklingen av karstlandskapets ytmorfologiska karakteristika (jfr. Sanders 1921, Cvijić 1923).

Davis grundvattenteorier modifierades av Swinnerton (1932), som hävdade att vattnet i punkten A (fig. 5) strömmade i banor mot erosionsbasen. Mängden vatten i de olika banorna stod i förhållande till med vilken lätthet vattnet kunde nå erosionsbasen. Mest vatten kunde förmodas rinna fram i bana 1 och minst vatten i bana 3. Detta på grund av att sprickorna nära markytan vidgats mest genom korrosion och därmed erhållit den största vattenförande kapaciteten och det minsta friktionsmotståndet. Rhoades & Sinacori (1941) vidareutvecklade Swinnertons idéer. De förmodade att grundvattenflödet koncentrerades i närheten av karstkällor, vilka antogs markera grundvattenytan, varvid en bakåtskridande erosion, med utbildandet av en "master conduit", ägde rum (fig. 5). De framförda tankegångarna, som innebär en maximal subterran erosion i närheten av grundvattenytan, påminner i hög grad om de idéer som framfördes av Grund (1903). Bland de amerikanska forskare som i princip anslöt sig till de av Davis initierade grundvattenteorierna, ibland med vissa modifikationer, kan nämnas Bretz (1938, 1942), Gardner (1935) och Moneymaker (1941) medan Malott (1937,1939) efter att ha studerat ett stort antal grottor i Kentucky och Indiana ansåg att dessa uteroderats av vadöst vatten. Snarare än att från markytan nedsipprande vatten började cirkulera i redan färdiga grottsystem ansåg han att dessa utbildats av bäckar, floder etc. som slukats och fått ett underjordiskt lopp.

Under tiden utvecklades karstforskningen i Europa i en helt annan riktning. Den kritik och de teorier som framförts av Katzer (1909) gentemot Grund togs upp till behandling och vidareutvecklades av Lehmann (1932). Hans arbete grundade sig, förutom på egna och andras iakttagelser i fält, i hög grad på utförda hydro-mekaniska laboratorieförsök där han med hjälp av kommunicerande kärl försökte påvisa vilka lagar som styr vattnets beteende i underjorden. Förutsättningen för en subterran vattencirkulation är enligt Lehmann närvaron av "karsthydrografiskt verksamma hålrum". Dessa "hålrum" utgörs av tektoniskt betingade sprickor och håligheter tillräckligt vida för att kapillär och friktionskrafter skall kunna övervinnas. De karsthydrografiskt verksamma hålrummen utgör tillsammans ett el-

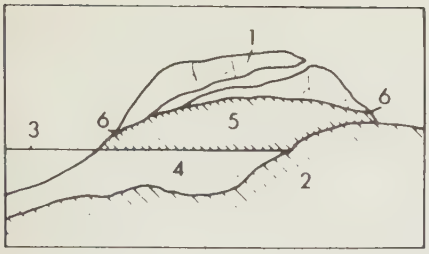
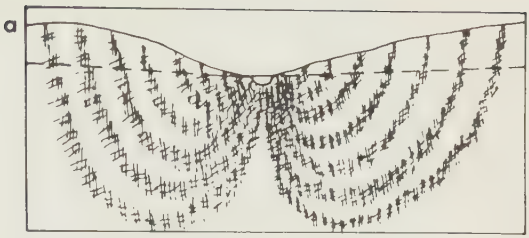
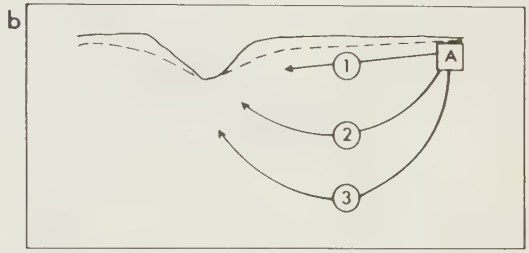


Fig.4. Grunds grundvattenteori.
1. Permeabelt karstmassiv.
2. Impermeabel bas.
3. Hav.
4. Grundvatten.
5. Karstvatten.
6. Karstkällor.

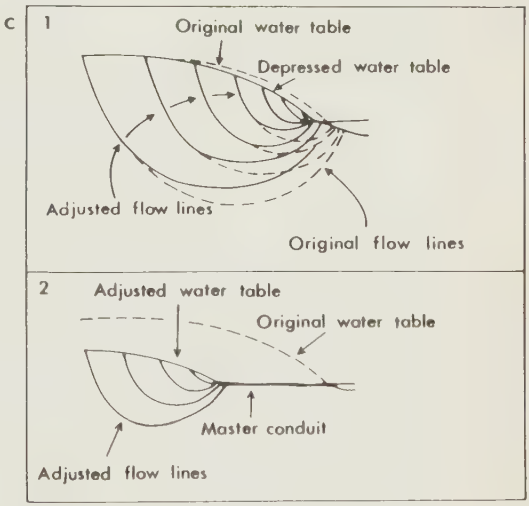
Grund's ground water theory.
1. Permeable karst mass.
2. Impermeable basis.
3. Sea.
4. Ground water
5. Karst water.
6. Karst springs.
(efter Sweeting 1972).



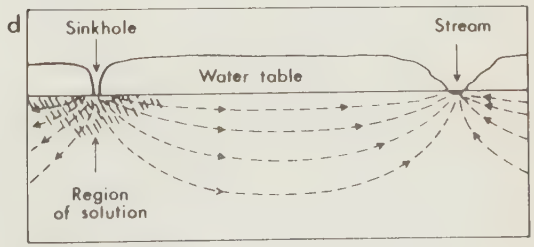
Davis 1930



Swinnerton 1932



Rhoades och Sinacori 1941



Thrailkill 1968

Fig.5. Grundvattenflöden i kalksten.

Patterns of ground water flow in limestone (efter Davis 1930, Swinnerton 1932, Rhoades and Sinacori 1941, Thrailkill 1968).

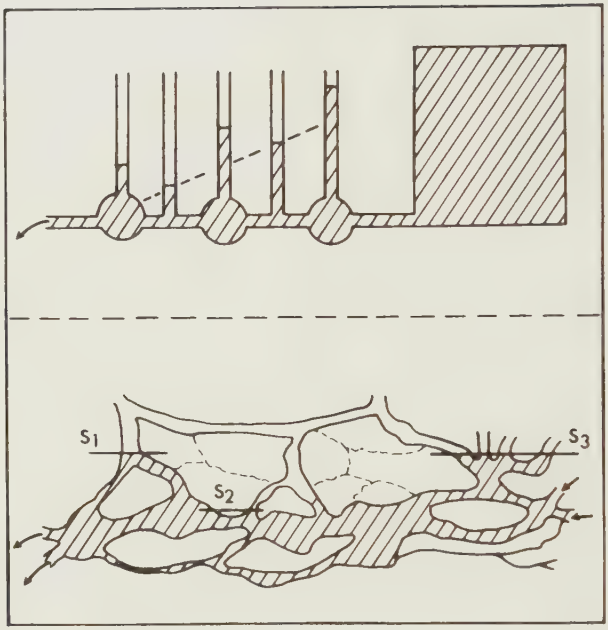


Fig.6. Effekten av varierande gång tvärsnitt och hydrostatiskt tryck på vattennivån.

Effect of varying cross section and hydrostatic pressure on water levels (efter Lehmann 1932).

ler flera system av kommunicerande kärl där vattnet följer de hydrostatiska lagarna (fig. 6). Han urskiljer tre hydrografiska zoner; underst vattenfyllda gångar där det cirkulerande vattnet alltid står under hydrostatiskt tryck, en mellanzon där vattnet ibland cirkulerar fritt (vadöst vatten) och ibland står under hydrostatiskt tryck samt överst ett system med fri vattenföring. I likhet med Cvijić ansåg Lehmann att efterhand som denudationen fortskrider vandrar de tre zonerna allt djupare varvid vatten under hydrostatiskt tryck efterhand ersätts med vadöst vatten. Härvid ommodulleras de cirkulära eller ellipsformade gångarna, utbildade under freatiska förhållanden, genom att erosionen koncentreras till gångarnas botten. Han förnekar existensen av ett integrerat grundvattensystem med gemensam grundvattenyta och påpekar att inom ett och samma karstområde kan områden med välutvecklade underjordiska dräneringssystem uppträda bredvid zoner som helt saknar grundvatten. Torrlagda grottsystem kan förekomma tillsammans med intermittenta eller permanenta karstkällor. Allt vatten som cirkulerar på ytan eller subterrant i ett karstområde föreslås få beteckningen "karstvatten" (jfr. Grund 1903).

Davis å ena sidan och Lehmann å den andra kan sägas ha bildat skola med avseende på den karsthydrografiska utvecklingen. I USA och i viss mån i England har den moderna forskningen i hög grad influerats av tidigare framförda åsikter om existensen av en grundvattenyta, i närheten av vilken den maximala erosionen äger rum, och vars fluktuationer är beroende av erosionsbasen, medan man i de stora europeiska karstområdena, framförallt i Jugoslavien och de alpina områdena, har anammat Lehmanns idéer om de kommuniceran-de kärlen. Den stora skillnaden mellan den amerikanska och den europeiska skolan kan till stor del bero på att företrädarna för skolorna arbetat i karstområden vilka starkt skiljer sig från varandra med avseende på geologi. De amerikanska undersökningarna har oftast utförts i områden där kalkstenen är lagrad i nästan horisontella eller mycket svagt stupande skikt (låglandskarst) medan de europeiska undersökningarna ofta utförts i områden där kalkstenen har en kraftig, nästan vertikal stupning och berggrunden är störd genom veckningar och tektoniska dislokationer (bergskarst).

Utbildandet av s.k. karstplan (Karst levellings, Karst-Niveaus) som t.ex. botten på poljes eller de slättområden som åtskiljer "tornen"

i Turmkarst anses av Louis (1956) inte ha något samband med havsytan eller något eventuellt karstgrundvatten utan anses bero på att det underjordiska dräneringssystemet av någon anledning inte kan sluka allt ytvatten. I stället för en fortsatt karstutveckling i vertikalled erhålles då en erosion som arbetar i horisontalled med en peneplanering som följd. Även Roglić (1965) förnekar att havsytan som erosionsbas har något inflytande på karstutvecklingen. Liksom Davis hävdar han att korrosion kan ske på mycket stora djup under havsytan och anför exempel från bland annat Florida där man funnit cirkulerande aggresivt vatten 2000 meter under havsytan. Den Dinariska Karsten i Jugoslavien, inom vilken det finns berg överstigande 2000 meter, kan på sina platser uppvisa en årsnederbörd överstigande 5000 mm. Detta vatten försvinner snabbt underjordiskt utan att kunna spåras och når djup oberoende av havsytan. Berggrundsstrukturens betydelse som grundvattenledare har betonats av många och förutom sprickornas roll som vattenledare har betydelsen av skiktfogar och veckaxlar framhållits i detta avseende (Glennie 1954, Rasmusson 1957, Ford 1971, Ford 1971). Warwick presenterade 1960 en sammanfattning över huvudkarakteristika för Englands och Wales kalkstensregioner. Han ansåg att allt tyder på att grundvattenytor, vilkas fluktuationer är beroende av havsytans läge, verkligen existerar. Liknande resultat har erhållits efter undersökningar utförda i USA av Thrailkill (1968) vilkens Davisinfluerade syn på grundvattenströmningarna i karst framgår av fig. 5. Efter många års erfarenhet från karsthydrografiska undersökningar i Österrikiska Alperna framför Zötl (1957, 1960, 1965) åsikten att den underjordiska dräneringen kan vara bunden till en erosionsbas. Han säger också: ".....although it was possible to prove the existence of an on the whole interconnected karst water system, the possibility of a complete transfer of the concept of the characteristics of ground water in loose permeable rock to the conditions in limestone mountains does, however, not exist" (Zötl 1957). Åsikterna grundade sig huvudsakligen på spårförsök i grundvatten med Lycopodium sporer.

Existensen av grundvattenytor och subterrant utbildade karstnivåer (grottsystem utvecklade på olika nivåer) anses av Bögli (1966) vara bevisat utan någon som helst tvekan. Han anför en av världens största grottor, Hölloch, som exempel. "A karst water surface, like

the level of water under pressure, behaves according to hydromechanical laws and is thus more aptly called pietzometric surface. Its location is largely determined by the main drainage". I närheten av den pietzometriska ytan sker den huvudsakliga erosionen varvid extensiva grottgallerier utbildas (karstnivåer). Ett klart samband mellan karstnivåer och dalbildning anses föreligga, vilket man också ansett sig kunna påvisa i Moravský Kras i Tjeckoslovakien (Štelcl 1963).

Sweeting (1972) anser, trots att någon egentlig grundvattenyta jämförbar med den som finns utvecklad i porösa bergarter som sandsten och kalk normalt inte existerar i kalksten, att fyra hydrodynamiska karstvattenzoner kan urskiljas:

a) The zone of aeration, in which the downward movement of infiltration and inflow water prevails. This includes "suspended water" or perched water.
b) The zone of seasonal fluctuations of karst water. This zone is transitional; when the water-level falls, it becomes part of the zone of aeration; when the water-level rises it merges with the zone of full saturation.
c) The zone of full saturation where drainage is governed by the local drainage network. In this zone karst water move all the year round.
d) The zone of deep cirkulation, where the groundwaters are not influenced by any local drainage network. This zone is characterised by slow water exchange.

Den framförda åsikten kan betraktas som en kontamination av tidigare redovisade grundvattenteorier.

IV 2. MORFOLOGI

Först i slutet av 1930-talet uppmärksammades på allvar klimatets inverkan på utvecklandet av karst. Att den kemiska lösningsprocessen var beroende av klimatfaktorer insågs redan av Cvijić 1893. H. Lehmann publicerade 1936 ett arbete om tropisk karst på Java som kan betraktas som inledningen till en ny era inom karstforskningen. Vid ett karstsymposium som hölls i Frankfurt am Main 1953 presenterade P. Birot en karstklassificering vilken grundar sig på skillnader i morfologi och hydrologi inom olika klimatområden (Lehmann et al. 1954). De cykliska teorierna övergavs och tidigare framför-

da teorier som att t.ex. poljes och tropisk karst skulle utgöra ett moget och åldrat stadium i den cykliska utvecklingen vederlades (Lehmann 1936, 1954, 1956, 1959). "In view of the fact that the development of Karst depends on climatic conditions, it was not fortunate that the classical Karst research started out with the Karst regions of the middle latitudes. The landforms of Karst are complex in this zone and are no pure forms of corrosion because they were exposed to changing climamorphological conditions during their development" (Lehmann 1956). Klimatforskningen intensifierades under 50- och 60-talen och en mängd arbeten företrädesvis från tropiska karstområden har presenterats av vilka kan nämnas Wissman (1954), Lehmann et al. (1956), Sweeting (1958), Gerstenhauer (1960, 1973), Sunartadirdja & Lehmann (1960), Verstappen (1964, 1969), Balázs (1972), Jennings (1969, 1971) och Panoš et al. (1968).

En sammanfattning av var den tropiska karstforskningen står i dag har gjorts av Sweeting (1972). Den tropiska karsten kännetecknas av en positiv relief bestående av uppstående konliknande kullar (kegel karst, cone karst, mogotes) eller tornliknande kullar (turm karst, tower karst) med nästan vertikala stupande sidor till skillnad från karst utbildad i tempererade områden där landskapet snarare karakteriseras av ett plan mer eller mindre söndersplittrat av depressioner. Mellan utvecklad "kegel karst" och "turm karst" finns olika typer av övergångsformer. Turm karst kan sägas vara en typ av kegel karst utvecklad under speciella hydrologiska förhållanden. Den tropiska karsten är betingad av hög årsnederbörd, hög temperatur och en riklig vegetation. Den höga nederbörden ger en kraftig lösning av kalksten på ytan. Vattnet mättas snabbt på grund av de höga temperaturerna vilka påskyndar de kemiska reaktionerna. Lösningen av kalk på markytan intensifieras ytterligare av att vattnet då det trängt igenom vegetations- och jordtäcke anrikats i hög grad på CO_2. Enligt Birot (1954) kan CO_2 koncentrationen i jordtäcket vara 10-100 ggr större än i den fria atmosfären. Det mättade vattnet slukas i botten på de polygonala depressioner (cockpits) som utbildats mellan kullarna. Dessa depressioner kan betraktas som en motsvarighet till de tempererade dolinerna. Kunskaperna om den tropiska karstens genes är fortfarande relativt rudimentär och det är ännu inte helt fastställt i vilken grad dess utveckling påverkats av ren korrosion, fluviatila processer och e-

rosionsbasens fluktuationer. Betydelsen av berggrundens struktur, kemiska sammansättning och tektonik har påpekats av flertalet av de ovan nämnda författarna.

I samband med den ökade floran av tropisk karstlitteratur uppmärksammades i Europa existensen av fossila karstformer. Corbel (1957) beskriver ett karstområde i Mendip i England där isolerade kullar tolkas som relikt Kegel Karst. Avsaknaden av karst utvecklad på djupet och bristen på grottor tolkas som en indikation på att karsten utbildats under tropiska betingelser. I Polen urskiljer Gilewska (1965) flera utvecklingsfaser av karst från perm till nutid. Hon understryker att karst alltid utvecklas under humida förhållanden framför allt under perioder som följer direkt på olika typer av rörelser i jordskorpan eftersom dessa ger upphov till förändringar i reliefen och skapar spricksystem som i sin tur aktiverar karstprocesserna. Under heta och fuktiga klimatfaser utbildades stora karstdepressioner, medan utbildandet av väldiga grottsystem ägde rum under pleistocen samtidigt som ytkarstprocesserna var av mindre betydelse. Exempel på tropisk eller sub-tropisk karst i form av Turm Karst (tower karst) norr om Krakow beskrivs ingående av Gilewska (1964). Fossil tropisk karst i Tjeckoslovakien har beskrivits av Panoš (1964) medan Büdel (1951) och Maurin et al. (1966) behandlat liknande former i Grekland. Bland övriga som beskrivit fossil karst i Europa kan nämnas Gavrilović (1969) vilken tagit upp fossil Kegel Karst i Jugoslvien till behandling och Sweeting (1973) som behandlat fossil karst i England.

Gemensamt för de flesta klimatmorfologiska karstarbetena har varit att man utifrån variationer i karstmorfologi mellan olika klimatområden försökt draga slutsatser angående landskapstypernas genes. Därvid kom man osökt in på hur klimatet påverkar de karstprocesser som givit upphov till de olika karsttyperna. "Up to now the studies of the influence of climate on the development of karst were based on the comparision of forms. In the future quantitative chemical research on the processes of corrosion has to be performed in the different climates....." (Lehmann 1956).

IV 3. PROCESSER

Forskningen om karstprocessernas verkan och beroende av ytterliga-

re betingelser har dominerat den internationella karstlitteraturen under hela 60-talet och in på 70-talet. De grundläggande arbeten som initierade denna forskning presenterades av Trombe (1952), Corbel (1952, 1957) och Bögli (1956). Framförallt Corbel har givit upphov till en lång och intensiv debatt då han 1957 presenterade en mängd värden på den kemiska denudationen från Congo och Java i söder till Spetsbergen i norr. Denudationsvärdena hade beräknats på grundval av utförda kemiska analyser i vattendrag inom olika klimatområden. Han ansåg denudationen vara upp till hundra gånger större i arktiskt klimat än i tropiskt. Vattnet i arktiska och subarktiska områden ansågs vara mer aggressiva och därmed ha större förutsättningar att lösa kalksten än vatten i andra klimatområden. Orsaken till detta var enligt Corbel (1957, 1959, 1960) att vatten vid 0° C kan lösa 1,6 ggr så mycket CO_2 som vid $+20^{o}$ C. Corbel bortsåg emellertid från en mycket viktig CO_2 källa. Redan 1952 påpekade Birot att CO_2-halten i jordlagrens atmosfär, till följd av anrikning genom biologiska processer kan vara upp till 100 ggr större än i den fria atmosfären. Vegetationens stora betydelse som CO_2 producent har betonats av bl.a. Bögli (1956, 1960), Sweeting (1960, 1964), Jennings (1971) och Jakucs (1973 b). Betydelsen av andra faktorer än temperatur, vegetation och jordtäcke vid mätningar av förkarstningsintensiteten, vilken den kemiska denudationen ansågs vara ett mått på, underströks av bl.a. Sweeting (1965). Faktorer som berggrundens kemiska och fysikaliska egenskaper såsom karbonathalt, kornstorlek, porvolym, vattenhållande förmåga och permeabilitet ansågs vara av betydelse liksom storlek, intensitet och typ av nederbörd samt mikrobiologiska organismers aktivitet (Smyk et al. 1964, Gams 1965, Štelcl et al. 1966, Douglas1968, Panoš et al. 1968, Štelcl 1972). Efterhand som allt fler undersökningar om de kemiska koncentrationerna i karstvatten inom olika klimatområden publicerats har kritiken mot de av Corbel framförda synpunkterna vuxit. Presenterade resultat antydde att mängden kalcium- och magnesiumkarbonat som gått i lösning var större eller lika stora i de tropiska och sub-tropiska områdena som i de tempererade (Sweeting 1960, Sweeting et al. 1960, Bögli 1960, Groom et al. 1965, Raušer et al. 1965, Gams 1969, Štelcl et al. 1969, Smith 1965, 1969, Jennings 1972, Harmon et al. 1972).

De kemiska processernas beroende av bl.a. temperaturfaktorn har in-

gående behandlats av Bögli (1956, 1960) samtidigt som han påvisat hur olika typer av processer kan ge upphov till olika morfologiska former. Hans resultat har i hög grad påverkat den moderna forsningens syn på hur korrosionsprocessernas intensitet och verkan varierar inom olika klimatområden.

Då karstlandskapet bl.a. kännetecknas av depressioner av olika slag är det naturligt att förmoda att korrosionen inom ett och samma område arbetar selektivt och med olika intensitet. Gams (1965) kallar den korrosion som i intensitet överstiger omgivningens för accelererad korrosion och anser att det är denna som ger upphov till karstlandskapets karakteristiska depressioner. Nedan anges de förhållanden under vilka accelererad korrosion enligt Gams kan väntas uppstå:

a) Vid övergången mellan impermeabel berggrund och karbonathaltig berggrund. De flesta vattenströmmar från icke kalkhaltig berggrund (alloktont vatten) vilka når gränsen för ett kalkstensområde slukas snabbt och får ett underjordiskt lopp. Vanligen utbildas halvblinda dalar. I detta fall är vattnet aggressivt och mer kalksten löses än vad som i genomsnitt löses i omgivningen.
b) Alluvial korrosion. Vatten som infiltreratsgenom sediment eller morän ger upphov till intensiv korrosion då det förmodas ha berikats på CO_2 under infiltrationen.
c) Mischungs Korrosion. Trots att Bögli bara behandlat de subterrana verkningarna av denna typ av korrosion påpekar Gams att det inte föreligger något hinder att den kan verka också på ytan då två vattenströmmar av olika hårdhet blandas.
d) Vid kanten av snö och isfält. Smältvatten anses hålla en högre CO_2-halt än regnvatten varför det genom sin aggressivitet ger upphov till accelererad korrosion.
e) Accelererad korrosion uppkommen då vatten passerar från naken till täckt karst. Med naken karst avses i detta fall karst vilken inte är täckt av vegetation och/eller jord medan täckt karst är motsatsen. Gams har funnit att då mättat vatten, som från naken karst når täckt karst, infiltrerats genom humus och jordtäcke i området med täckt karst återvinner det möjligheten att lösa mer kalk. Detta sker genom extra tillskottet av CO_2 då vattnet passerar genom jorden.

Det råder emellertid fortfarande stor tvekan om i vilken mån karst-

processerna kan korreleras med morfologi och klimat (Sweeting et al. 1960, Sweeting 1964, 1965, Jakucs 1973 a). Variationerna i resultat med avseende på den kemiska denudationen och på hur stora mängder kalk som gått i lösning är ofta stora inom ett och samma karstområde och ännu har man inte kunnat fastställa med säkerhet om och i så fall hur förkarstningsintensiteten varierar inom olika klimatområden. Vladimír Panoš, tidigare president i the Commission on Karst Denudation, i Internationella Speleologiska Unionen ställer sig skeptisk till den nuvarande utvecklingen inom karstforskningen. "The present situation in the karst denudation studies resembles to a certain degree the situation developed some time during the controversy on the character of the underground karst hydrography. ..... In the published papers on karst denudation problems it can be clearly seen that there exist similiar causes of antagonistic opinions. One important cause of differences consists in the various incomparable methods which, naturally, cannot yield uniform and commensurable data and results..... Another basic cause of the controversy consists in the evidently unequal estimations or even ignoration of a large complex of numerous geologic and physiographic factors that modifies considerably the theoretically uniform results of chemical processes in the same climatic conditions" (Panoš 1969). Då studiet av karstprocesserna står någonstans mitt emellan ett stort antal naturvetenskaper av vilka kan nämnas geologi, geokemi, geomorfologi, hydrologi, hydrogeologi och hydrokemi och samtidigt utnyttjar dessa vetenskapers metodik är det naturligt att problem uppstår. "Different approaches to the problems being solved, and different working procedurs are determined through dissimilar spheres and goals of special interest in individual fields of science on the one hand, and on the other hand they are deeply affected by conceptional differences inside individual branches" (Panoš 1972).

IV 4. LITTERATUR KRING SVENSK KARSTFORSKNING

Något mera ingående deskriptivt och genetiskt sammanfattande verk om svensk karstmorfologi finns inte. Översiktliga redogörelser över kalkstensområden i Sverige som uppvisar karstfenomen har emellertid publicerats av bl.a. Corbel (1952, 1957) och Tell (1955, 1964, 1973). Den svenske zoologen Lindberg, vilken publicerat en

lång rad artiklar om utländska karstgrottor av vilka kan nämnas Lindberg (1952,1954, 1958, 1963), gjorde 1956 en översiktlig sammanfattning över områden i Sverige vilka kännetecknas av karstfenomen. Sammanfattningen grundar sig huvudsakligen på tidigare publicerat material av Corbel, Tell, Svenonius (1880, 1910) och Rasmusson (1953, 1955).

Karstgrottorna vid Björkliden och Lullihatjårro vid övre delen av Torne Träsk har behandlats ingående av Rasmusson (1955, 1957, 1970). I samma område har senare de hydrologiska förhållandena beskrivits (Knutsson et al. 1967, Hellgren 1969). Förekomsten av karstfenomen på Södra Storfjället, väster om Tärnaby i Västerbottens län, har dokumenterats av Beskow (1929) medan Artfjällets karstområde tidigare behandlats av Helldén (1973 b, 1973 d, 1974 a). Ytterligare dokumentation om karstfenomen i Västerbottens fjällvärld har givits av Sjöberg (1970) samt i en lång rad artiklar av medlemmar i Sveriges Speleologförbund (SSF) publicerade i förbundets tidskrift Grottan.

Bjurälvens karstlandskap i NV Jämtland har beskrivits av bl.a. Svenonius (1880, 1910) och Festin (1922) medan karstfenomenen på Öland behandlats av Svensson (1963) och i ett par sammanfattande arbeten av Nilsson (1965, 1968).

Lummelundagrottan på Gotland har tilldragit sig ett betydande intresse genom åren och litteraturen kring dess morfologi, utbredning och hydrologi är förhållandevis riklig (Tell 1955, 1961, 1966, Gislén et al. 1948, Andersson et al. 1962, Lundevall 1965, Olsson et al. 1966)

Speleoklimatet i ett antal sydsvenska grottor, av vilka kan nämnas Balsbergsgrottan i Skåne, har belysts av Åkerman (1972). Den har tidigare behandlats av bl.a. Hanström (1947) och Freij et al. (1967).

Fortlöpande rapporter om svensk speleologi ges förutom i Grottan (1966 -) också i Tells (1961-1973) tidskrift Arkiv för svensk grottforskning.

En preliminär svensk grottbibliografi publicerades 1972 av Sjöberg.

V ARTFJÄLLETS KARSTOMRÅDE; MORFOLOGI, HYDROLOGI OCH KEMISKA PROCESSER

V 1. INLEDNING

Som ett led i utforskandet av grundvattnets och de kemiska processernas verkan och egenskaper i karst i arktisk och subarktisk miljö har ett karstområde på Artfjället (fig. 7), beläget i den kaledoniska fjällkedjan, söder om sjön Över-Uman i Västerbottens län undersökts under perioden 1970-72 med avseende på morfologi, hydrologi och kemiska processer. Den i undersökningsområdet belägna Sotsbäcksgrottan, för närvarande Sveriges största kända grottsystem, har karterats och presenteras med avseende på morfologi och speleoklimat. Karststråket sträcker sig från Över-Uman (520 m.ö.h.) upp mot Tjålt för att i ungefärlig höjd med sluket S_1 (850 m.ö.h.) överlagras av migmatitisk grönskiffer (fig. 9).

Fig.7. Artfjället,Sverige. The location of area studied in Sweden.

V 2. GEOLOGI

V 2.1. Allmänt

Berggrunden ingår i Seve-Köliskollans lågmetamorfa serie vilken söder om Över-Uman utgör gränsen mellan Rödingsfjällsskollans högmetamorfa berggrund i väster och det högre metamorfa fjällkomplexet "östra Artfjället-Norra Storfjället-Mesket-Gabbi" i öster (fig.8). Seve-Köliskollans lågmetamorfa serie representeras huvudsakligen av glimmerskiffrar, fylliter, grönstenar, migmatiter, kvartsiter, dolomiter och kalkstenar (Kulling 1955). Karststråket, vilket har en yta på 2,4 km^2 (fig. 9), är uppbyggt av delvis kristallin veckad kalksten vilken bildar bankar varierande i tjocklek från några cm till drygt 0,5 m. Kalkstenen är enligt Kulling troligen av ordovicisk ålder, likåldrig med Ropenkalkstenen i Södra Storfjället, och kan inrangeras i pieskeserien. Den är omgiven av en migmatitisk grön-

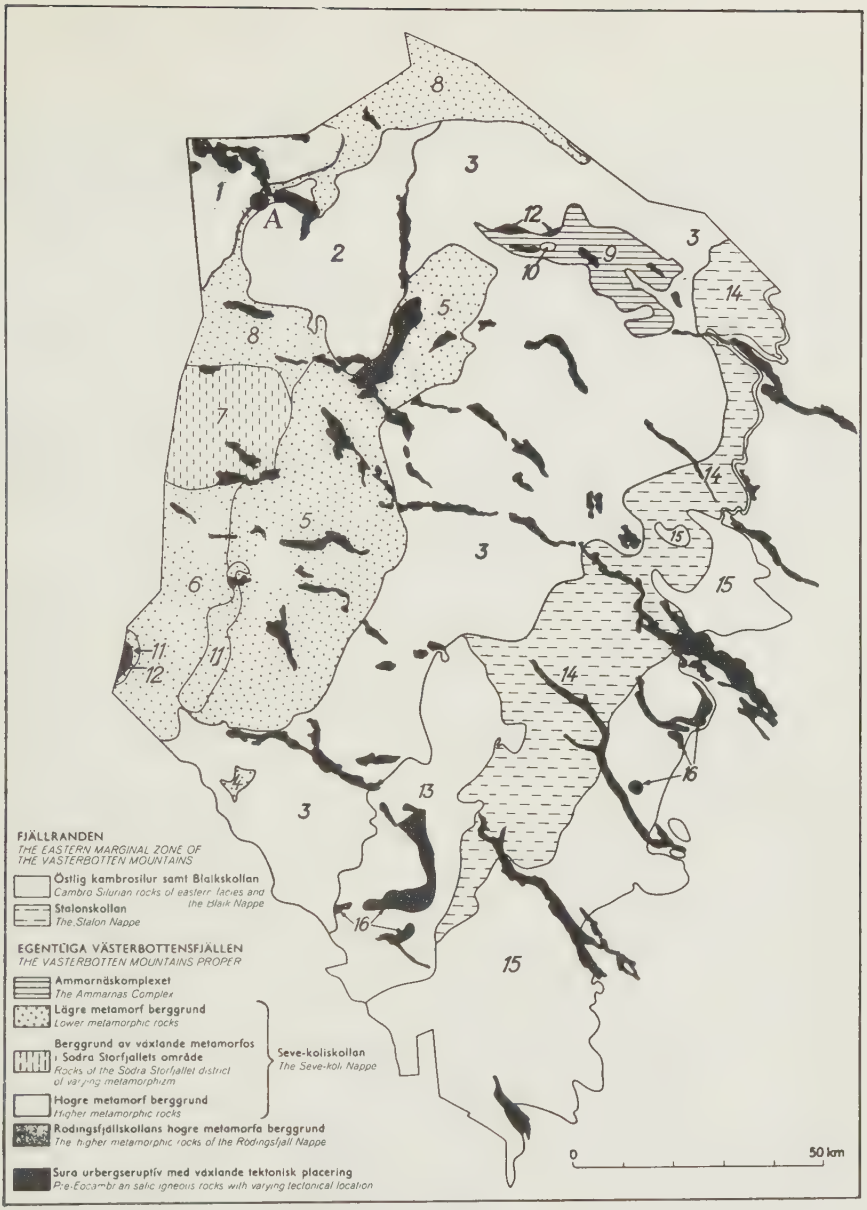


Fig.8. Västerbottens berggrund. A=Artfjällets karstområde. Högre metamorf berggrund:1, Rödingsfjällsskollans område. 2, Östra Artfjället-Norra Storfjället-Mesket-Gabbiområdet. Lägre metamorf berggrund:8, Nordvästområdet (ingår i Seve-köliskollan).

The bedrock of Västerbotten. A=the karst area of Artfjället. Higher metamorphic rocks: 1, The area of Rödingsfjäll Nappe. 2, The area of the east part of Artfjället-Norra Storfjället-Mesket-Gabbi. Lower metamorphic rocks: 8, The north-western area (a part of the Seve-köli Nappe) (efter Kulling 1955).

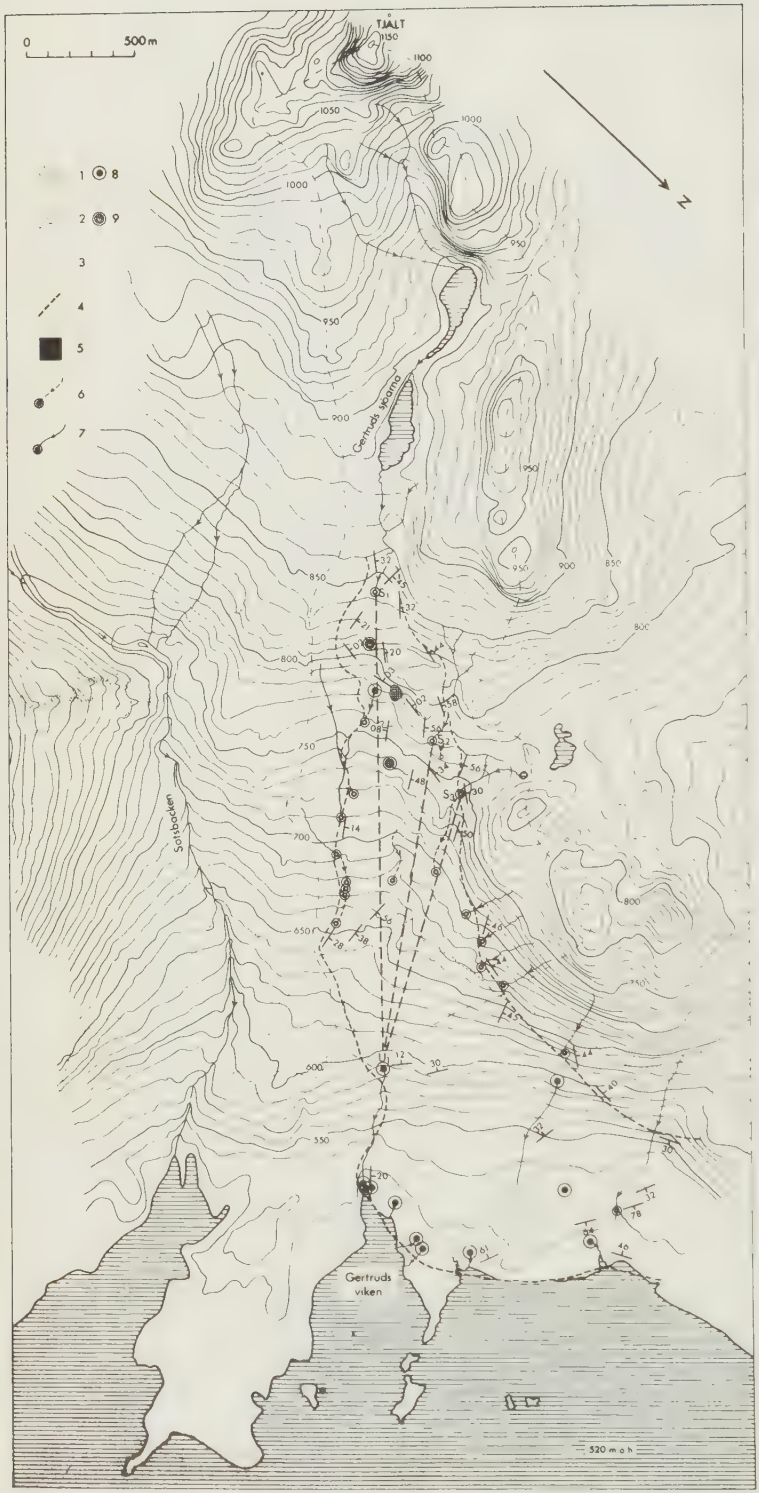


Fig.9. Artfjällets karstområde. Berggrundens strykning och stupning. Sluken S_1, S_2 och S_3 har subterran förbindelse med karstkällan U_1. 1) slukås, 2) mosse, sankmark, 3) trädgräns, 4) kalkstensgräns, 5) "Djävulskratern", 6) intermittent bäck med sluk, 7) permanent bäck med sluk, 8) karstkälla, 9) fossil karstkälla.

The karst area of Artfjället. Strike and dip of the bedrock. Swallets S_1, S_2 and S_3 have subterranean connection with karst spring U_1. 1) engorged esker, 2) peat-moss, 3) tree-limit, 4) limestone border, 5) "Devil´s Crater", 6) intermittent stream with swallet, 7) permanent stream with swallet, 8) karst spring, 9) fossil karst spring.

skiffer med inslag av kvartssliror. Kontaktzonen mellan kalkstenen och grönskiffern består av ett lager kalk- och kvartshaltig fyllit vilken upptar en bredd på 2-4 m.

V 2.2. Berggrundens utseende och tektonik

Kalkstenen är grå - blågrå till ljusgrå med inslag av vita kalcitstrimmor. Kornstorleken varierar från ca 0,5 mm till 3 mm. I berggrunden finns skikt och klumpar av kvartsit och grönskiffer inbakade. Kulling (1955) beskriver kalksten tillhörande samma serie vid Rödingsfjället som genomsatt av grönstenar vilka vanligen uppträder konformt med kalkstenens lagring. Under berggrundens sammanveckning har emellertid inte grönstenarna haft samma höga grad av plasticitet som kalkstenarna. Medan de senare ofta lagts i eleganta förtunnade eller förtjockade veck, har grönstenarna vanligen brustit sönder i linser och oregelbundna i kalkstenen "simmande" klumpar. Inom det undersökta karstområdet uppträder emellertid grönskiffern oftast konformt med den allmänna bankningen.

Lagren stryker i sina högre belägna delar i NE riktning för att ungefär i höjd med trädgränsen svänga av i VNV riktning (fig. 9). Då kalkstenen är kraftigt veckad och ibland uppvisar skrynklingsstrukturer som s.a.s. är oberoende av det allmänna vecknings- och bankningsmönstret varierar också stupningen därefter och antar värden mellan 10-50° med ett medelvärde kring 35° V. Sprickorna stryker i NNV-NE.

V 2.3. Berggrundens kemiska sammansättning

Den kemiska sammansättningen varierar avsevärt inom området och kalkstenen kan på grundval av nedanstående analysresultat ibland sägas vara dolomitisk. Två prover har analyserats vid Mineralogiska och Petrologiska Institutionen vid Lunds Universitet av Zoltan Solyum med avseende på halten CaO, MgO, Fe_2O_3 + FeO och CO_2. CaO och MgO halterna bestämdes genom komplexometrisk titrering med EDTA medan halten Fe_2O_3 + FeO bestämdes på atomabsorption. CO_2 halten har ansetts motsvara glödningsförlusten (tab. 1). I tabellen ges också jämförande värden på kemiska analyser av kalksten från Södra Storfjället (Beskow 1929) och kalksten från undre Seve-Köliskollan vid Lullihatjårrogrottan vid Torne Träsk (Hellgren 1969).

Tabell 1. Kemisk sammansättning av kalksten i viktprocent.

Prov	% CaO	% MgO	% K_2O	% FeO	% Fe_2O_3+FeO	% CO_2	Rest
1.	40,0	4,9	-	-	0,9	35,8	18,4
2.	31,1	18,1	-	-	0,1	43,6	7,1
3.	52,8	1,0	0,15	0,4	-	41,3	4,4
4.	51,9	0,6	0,03	0,4	-	40,0	7,1
5.	55,4	0,4	-	0,05	-	43,9	0,3

1. och 2: grå kalksten från Artfjället.
3. och 4: grå resp. vit kalksten från Torne Träsk (Hellgren 1969).
5: vit kalksten från Södra Storfjället (Beskow 1929).

Viktsprocenterna under "Rest" kan i första hand hänföras till SiO_2, Na_2O och Al_2O_3. Kalkstenens täthet har uppmätts till 2,6 g/cm^3.

V 2.4. Kvartär utveckling

Under den senaste nedisningens maximum rörde sig landisen inom ett område, vilket är beläget väster om isdelarna, från öster mot väster eller västnordväst. När istäckets mäktighet efterhand avtog, som en följd av avsmältningen under istidens slutskede, stack de högsta fjällpartierna fram genom detsamma och fick med tiden en mer eller mindre avlänkande effekt på ismassorna. Vid ett längre framskridet stadium i avsmältningen antas ismassorna ha följt huvuddalarna som verkliga dalglaciärer. Dessa retarderade gradvis mot öster varvid förutsättningar för utbildandet av stora issjöar i dalgångarna uppstod. Detta senglaciala skede lämnade många spår kring sjön Över-Uman, vilken ingick i det isdämda komplexet Gäutaissjön (Gavelin 1910) med en storlek på 550-600 km^2. Issjöns strandlinjer ligger vid Över-Uman ca 20 m över nuvarande vattenstånd och är utbildade huvudsakligen i glacifluvium. Mäktiga slukåsar på båda sidor om Sotsbäcken (fig. 9) och deltabildningar vid Över-Umans södra strand ger en antydan om det subglaciala smältvattnets verkan under senglacial tid.

V 2.5 Moräntäcket

Moräntäcket inom kalkstensstråket antar ett djup varierande från 0 till ca 30 cm i området ovanför kalkstensgränsen och 30-40 cm nedanför. Moränen är sandig och något urtvättad som en följd av

sluttningsprocesserna. Den är ibland underlagrad av ett tunt lager frostvittrad jord. Ca 75% av ytan ovanför trädgränsen är täckt av jord medan området nedanför detsamma är täckt till i det närmaste 100%. Stora delar av området under 20-m nivån består av glaciflu-vium, framför allt uddarna som inramar Gertrudsviken.

V 3. KLIMAT

Närmaste klimatstation är belägen i Hemavan ca 25 km SO om undersökningsområdet i Umeälvens dalgång 450 m.ö.h. Stationen har fortlöpande observationer från 1965. Årsmedeltemperaturen för perioden 1965-72 är -0,8° C och årsmedelnederbörden är 685 mm. Temperaturens och nederbördens fördelning under året framgår av nedanstående tabell (tab. 2). För att erhålla giltiga värden för undersökningsområdet har temperaturen korrigerats för höjden 750 m.ö.h. enligt Ångströms (1938) beräkningar.

Tabell 2. Månatliga temperatur- och nederbördsvärden för Hemavan (H) (450 m.ö.h.) för perioden 1965-1972 samt månatliga temperaturmedelvärden för undersökningsområdet (U) (750 m.ö.h.) enligt korrigering efter Ångströms (1938) beräkningar.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
$Temp_H$:	-14,9	-13,0	-6,7	-2,2	3,7	10,4	11,0	10,4	5,3	0,4	-6,4	-7,8	-0,8°C
$Temp_U$:	-16,0	-14,3	-8,1	-3,9	2,0	8,6	9,2	8,6	3,7	-1,0	-7,0	-8,5	-2,2°C
$Nb._H$:	50	36	69	35	29	41	98	54	65	81	63	64	685 mm

Observeras bör att bara 5 månader/år är frostfria och att det således endast är under denna tid som korrosionsprocesserna på markytan kan fortgå. Den underjordiska dräneringen pågår emellertid hela året om än i mycket begränsad omfattning under vinterhalvåret. Årsnederbörden inom det undersökta dräneringsområdet, vilket har en yta på 3,68 km^2 och en differens i höjd mellan 1170-595 m, har beräknats på grundval av de vattenföringsmätningar som utförts två gånger om dagen under maj-augusti och en gång om dagen under en vecka i december 1971. Under vintermånaderna 1971-72 har vattenföringen uppskattats okulärt ungefär en gång i månaden. Årsnederbörden 1000 mm (1009 mm) blev resultatet av beräkningarna. Enligt Atlas

över Sverige blad 32 ligger årsmedelnederbörden för perioden 1901-1930 mellan 1000-1200 mm. Evaporationen har uppskattats till 150mm/år (155 mm) med hjälp av Tamms formel (Ångström 1958). $E = 30 \cdot t + 221$. E = evaporationen i mm, t = årets medeltemperatur i ^{o}C.

Av de presenterade värdena framgår att områdets klimat enligt Köppens klassificeringssystem (Köppen 1936) är av typen ET, tundraklimat. Det bör emellertid noteras att någon permafrost inte existerar.

Den 11/6 1971 var ca 5% av markytan nedanför trädgränsen täckt med snö och 65% av markytan ovanför densamma. Omkring den 25/6, dvs. fjorton dagar senare hade i det närmaste all snö smält undan.

V 4. MORFOLOGI

V 4.1. Allmänt

Karststråket är delvis utformat genom selektiv glacialerosion och i sluttningarna bakåtskridande nival erosion vilka givit upphov till en trappstegsliknande morfologi. Genom korrosion och frostprocessers verkan har sedan ett karstlandskap vuxit fram med utpräglade depressioner, snödoliner (kotlici), karren och ett välutvecklat underjordiskt dräneringssystem.

Ingen av de alloktona bäckar som når karstområdet rinner över mer än ca 100 m kalksten innan de försvinner underjordiskt via något sluk. Hela dräneringsmönstret är subterrant utom tillfällighetsvis under snösmältningsperioden i slutet av maj och början av juni då autoktont smältvatten kan ge upphov till mindre bäckar. Av de sluk som finns markerade på kartan (fig. 9, 20) slukar S_1, S_2 och S_3 mer än 95% av den alloktona vattenföringen. Övriga sluk är av mer eller mindre intermittent karaktär och fungerar huvudsakligen under vårsmältningen. S_1 dränerar den största bäcken som når kalkstensstråket och utgör samtidigt ingång till Sveriges största kända grottsystem vilket utgör en integrerad del av det subterrana dräneringssystemet. Den bäck som slukas av S_1 har sin källa i de glacialt betingade Gertrudssjöarna.

Några blinda eller halvblinda dalar i egentlig mening finns inte utbildade. De alloktona bäckarna har haft allt för kort tid på sig sedan inlandsisens avsmältning för ha hunnit utbilda några sådana.

Bäckarna har emellertid eroderat ner sig i kalkstenen 0,5-1 m innan de slukas. En motsvarighet till halvblinda dalar finns i de knappt halvmeterdjupa fåror som uteroderats av det smältvatten som tillfällighetsvis kan uppträda på ytan kortare sträckor under snösmältningsperioden. Mellan utloppet U_1, vilket är det i särklass största inom området, och Gertrudsviken har en 3-10 m djup och 2-5 m bred säckdal utbildats.

V 4.2. Depressionstyper

De depressioner som karakteriserar landskapet och ger det dess söndersplittrade och kaotiska karaktär kan på grundval av morfologi och genes indelas i fem typer: sluk (swallet), lösningsdolin (solution doline), snödolin (kotlici, snow doline), sprickdolin och instörtningsdolin (collapse doline).

1. Sluk. Slukhål kallas de depressioner i vilka vattendrag försvinner för att ingå i det underjordiska dräneringsmönstret. Om sluket har formen av lösningsdolin, sprickdolin eller instörtningsdolin benämnes det lösningssluk, sprickslukrespektive instörtningssluk. Då denna typ av slukklassificering inte är känd i litteraturen bör ytterligare några ord sägas. Sweeting (1972) skiljer på två huvudtyper av sluk nämligen; a) sluk med liten eller ingen topografi med vilka i första hand avses s.k. subfluviala sluk till vilka en flod omärkligt avger vatten nedströms tills flodfåran helt torkat ut. b) slukhål med tydlig topografi med vilka avses sluk i samband med grottor (ponors), sprickor, vertikala schakt och sluk utbildade i kalksten täckt med morän eller sediment. Ovan nämnda klassificering är emellertid exaktare och mer praktiskt tillämpbar för morfometriska analyser i det berörda karstområdet.
2. Lösningsdolin är en typ av depression som utbildas genom att regn och smältvatten rinner fram längs sprickor i berggrunden och löser ut denna. Resultatet blir en slutan depression med en flack botten och svagt stupande sidor. Dolinen är vanligen täckt med ett tunt lager jord medan det på dess botten har ackumulerats residualt och nedspolat material (fig. 10).
3. Snödolin, kotlici är en karstdepression vilken helt eller delvis är fylld med snö större delen av året. Dess utveckling är beroende av frostvittring och accelererad korrosion genom från

Fig.10. Lösningsdolin.

Solution doline.

Fig.11. Snödolin (kotlici) (aug. 1971).

Snow doline (Aug. 1971).

Fig.12. Sprickdolin.
Joint doline.

Fig.13. Instörtningsdoliner.
Collapse dolines (July 1971).

snön kommande CO_2 anrikat smältvatten. Sidorna är branta och ibland täckta av frostvittrade stenar och block (fig. 11).

4. Sprickdolinen är utbildad längs en spricka eller skiktfog i kalkstenen. Längden överskrider vanligen bredden med 2,5 ggr. Sprickdolinen absorberar yt- och regnvatten och leder ned det i det underjordiska dräneringssystemet. Den skiljs därmed från sprickkarren, vilket är karrenfåror utbildade genom att sprickor vidgats genom korrosion, som leder vatten i sin fåra utan att detsamma förs in i det subterrana dräneringssystemet (fig. 12).
5. Instörtningsdoliner är depressioner vilka uppstått genom att delar av det underjordiska dräneringssystemet störtat in. Den största instörtningsdolinen inom karstområdet, "Djävulskratern", har en diameter på 50 m och står i direkt kontakt med det vattendrag som slukats vid S_1 och som via Sotsbäcksgrottan passerar 34 m under kratern (fig. 13, 14).

V 4.3. Karren

Bland de karrenformer som förekommer representeras, enligt Böglis (1960) klassificering, den fria karrengruppen av Rillenkarren, Rinnenkarren och Sprickkarren (Kluftkarren) den halvfria gruppen av Hohlkarren och den täckta gruppen av Rundkarren. Grottkarren förekommer också men kommer att behandlas först i samband med Sotsbäcksgrottan.

1. Rillenkarren kan enligt Bögli undantagsvis uppnå en längd på 0,5 m i Europa. De kännetecknas av mycket skarpa kanter och uppträder enbart i sådana lägen att de kan utsättas för nederbördsvattnets korrosion. Typen förekommer i liten omfattning på Artfjället och då enbart på brant stupande exponerade kalkstenshällar (fig. 15 a).
2. Rinnenkarren utbildas också på nakna kalkstenshällar men bara då mängden nederbördsvatten är tillräckligt riklig för att en rännil skall kunna bildas. Den skiljer sig från Rillenkarren genom sin större storlek och genom att den i stället för att vara jämnbred efterhand vidgar sig i vattnets rörelseriktning (fig. 15 b).
3. Sprickkarren (Kluftkarren) är utbildade genom att sprickor eller skiktfogar vidgats genom korrosion. Bögli har hänfört den till gruppen fria karren med motiveringen att de förhållanden som

Fig.14. Instörtningsdolinen "Djävulskratern"
The collapse doline "Devil's Crater" (July 1971).

Fig.15 a. Rillen och Rinnenkarren i kalksten överlagrad av kalkrik fyllit.
Rillen and Rinnenkarren in limestone covered by calcareous phyllite.

Fig.15 b. Rinnenkarren. Tumstocken är 1 m.
Rinnenkarren. The stick is 1 m long.

Fig.16. Sprickkarren (Kluftkarren).

Fig.17. Hohlkarren. Längd 1 m.
Hohlkarren. Length 1 m.

Fig.18. Rundkarren.

Fig.19. Mikrokarren.
"Micro karren".

kännetecknar de övriga grupperna inte är tillämpliga på sprickkarren. Denna karrentyp kan emellertid utbildas, inte bara av rent nederbördsvatten, utan också av vatten som passerat genom humus och jordlager. Som bidragande faktor till anläggandet kan också nämnas biologiska och mekaniska vittringsprocesser varför sprickkarren egentligen borde bilda en egen grupp (fig. 16).

4. Hohlkarren är Rinnenkarren vilka omvandlats genom inverkan av vegetation, humus och jord som anrikat vattnet på biogen koldioxid varvid Rinnenkarren förstoras och får ett säckformigt tvärsnitt (fig. 17).
5. Rundkarren har utbildats genom att andra karrenformer täckts med humus och jord och därvid omformats varvid de förstorats och alla skarpa kanter avrundats. De kan också ha utbildats primärt under ett täckande jord och/eller vegetationstäcke (fig. 18).

Till dessa typer, av vilka Rinnenkarren, Sprickkarren och Hohlkarren är de vanligaste, kommer en mängd svårdefinierade små former vilka kan samlas under begreppet "mikrokarren". Till denna grupp hänföres hål, sprickor och fåror av små dimensioner vilka utbildats genom en kombination av vattnets korrosion, frostvittring och biologisk aktivitet. Så kan t.ex. fläckar av lava eller mossa vilka fått fäste på någon ojämnhet i kalkstenen ge upphov till en selektiv erosion dels genom de organiska syrornas korrosion och dels genom att de attraherar och håller vatten i högre grad än sin omgivning varvid vattnet berikas på koldioxid och ökar sin korrosiva förmåga (fig. 19).

V 5. MORFOMETRI

Få typer av landskap är så lämpade för kvantitativa analyser som karstlandskapet. Landskapsformerna, vilka i tempererade och subarktiska områden huvudsakligen består av depressioner, karren, källor, sluk och underjordiska dräneringssystem, kan med lätthet mätas och behandlas statistiskt. Med hjälp av morfometriska parametrar kan ett material presenteras för läsaren exakt och sammanfattat och resultatet med lätthet jämföras med resultaten från andra undersökningsområden. Trots detta har de kvantitativa metoderna kommit till användning i mycket blygsam utsträckning och utvecklingen är fortfarande i initialskedet. Nedanstående presentation bygger till stora delar på den metodik som introducerats av Williams (1969,

1971, 1972 a, 1972 b).

V 5.1. Dräneringssystemet

V 5.1.1. Symboler

A = kalkstensområdets yta i km^2.

S = sluk

$\bar{H}_s$ = slukens genomsnittliga höjd över havet i m.

K_r = karstkälla

$\bar{H}_r$ = karstkällornas genomsnittliga höjd över havet i m.

ΣL = sammanlagda längden av samtliga vattendrag på kalksten.

L_u = horisontella avståndet mellan ett sluk och dess närmaste källa.

i = intermittent

p = permanent

f = fossil

σ = standardavvikelsen

V 5.1.2. Definitioner

1. Sluktäthet $D_s = \frac{\Sigma S}{A}$; ger ett mått på antalet sluk per ytenhet kalksten.
2. Källtäthet $D_r = \frac{\Sigma K_r}{A}$; ger ett mått på antalet källor per ytenhet kalksten.
3. Sluk/källkvoten $R_{sr} = \frac{\Sigma S}{\Sigma K_r}$; ger en indikation på det subterrana dräneringssystemets utbredning och förgrening. Ett vadöst system kan antas ha värden som är större än 1 medan välutvecklade freatiska system kan förmodas ha värden som understiger 1.
4. Det kortaste underjordiska genomsnittliga flödesavståndet $\bar{L}_u$; är det genomsnittliga horisontella avståndet mellan varje sluk och dess källa. Om sambandet mellan sluk och källa inte är känt avses avståndet mellan sluket och närmast belägna källa. Parametern ger en indikation på det underjordiska dräneringssystemets utbredning.
5. Källkoefficienten $V_{hr} = \frac{\sigma H_r \cdot 100}{\bar{H}_r}$; där σH_r är provets standardavvikelse. Källkoefficienten är ett mått på karstkällornas variationer i höjd och kan tolkas som ett mått på grundvattenytans konformitet. Den kan därmed ge en uppfattning om det subterrana dräneringssystemets utvecklings- och utbredningsmönster. Låga värden på V_{hr} antyder existensen av en konform grundvattenyta

medan höga värden antyder att någon grundvattenyta inte existerar. Källorna har på grundval av sina höjdlägen i terrängen kunnat grupperas till tre höjdnivåer $\overline{H}_{ra}$, $\overline{H}_{rb}$ och $\overline{H}_{rc}$. Det finns inga indikationer på att källnivåerna skulle vara betingade av underliggande impermeabla lager. Källkoefficienten anges separat för var och en av de nämnda grupperna.

6. Ytdräneringstäthet på kalksten $D_l = \frac{\sum L}{A}$; är ett mått på ytdräneringssystemets längd per ytenhet kalksten och därmed ett indirekt mått på karstområdets permeabilitet.

Valet av symboler kan tyckas märkligt. De är emellertid konstruerade på grundval av den engelska terminologin varvid A står för "area", S för "swallet", H för "height", K_r för "karst rising", D_s för "karst density" etc.

V 5.1.3. Resultat

Tabell 3. Presentation av antalet permanenta, intermittenta och fossila källor och sluk inom karstområdet samt källornas gruppering i nivåerna $\overline{H}_{ra}$, $\overline{H}_{rb}$ och $\overline{H}_{rc}$. σ= standardavvikelsen

	p	σ	i	σ	f	σ	p+i+f	σ
S	11,0	-	9,0	-	-	-	20,0	-
K_r	9,0	-	4,0	-	2,0	-	15,0	-
$\overline{H}_r$	564 m	76,6	586 m	14,5	778 m	56,6	598 m	111,4
$\overline{H}_{ra}$	750 m	0,0	775 m	0,0	778 m	56,6	770 m	35,4
$\overline{H}_{rb}$	595 m	0,0	-	-	-	-	595 m	0,0
$\overline{H}_{rc}$	522 m	2,4	522 m	4,0	-	-	522 m	2,7

Tabell 4. Fördelning av källorna på de tre nivåerna $\overline{H}_{ra}$, $\overline{H}_{rb}$ och $\overline{H}_{rc}$.

	p	i	f	p+i+f
$\overline{H}_{ra}$	1	1	2	4
$\overline{H}_{rb}$	2	0	0	2
$\overline{H}_{rc}$	6	3	0	9

Tabell 5. Presentation av dräneringssystemets ovan definierade karakteristika. Kalkstensområdets yta A = 2,4 km^2.

	p	i	f	p+i+f
1. D_s	4,5/km^2	3,7/km^2	-	8,2/km^2
2. D_r	3,7/km^2	1,6/km^2	0,8/km^2	6,1/km^2
3. R_{sr}	1,2	2,3	-	1,5
4. $\bar{L}_u$	0,9 km	1,1 km(1)	-	1,1 km
5. V_{hr}	13,6	2,5	7,3	18,6
V_{hra}	0,0	0,0	7,3	4,6
V_{hrb}	0,0	-	-	0,0
V_{hrc}	0,5	0,8	-	0,5
6. D_l	0,6km/km^2	0,5km/km^2	-	1,1km/km^2

/(1) mellan intermittenta sluk och närmaste källa/

Tabell 6. Fördelningen av sluk på tidigare definierade typer. Värdena inom parentes anger den procentuella fördelningen på totala antalet sluk.

	p	i	p+i
Lösningssluk	-	2 (10%)	2 (10%)
Instörtningssluk	8 (40%)	5 (25%)	13 (65%)
Spricksluk	3 (15%)	2 (10%)	5 (25%)

V 5.1.4. Sammanfattning

Det presenterade materialet ger en helhetsbild av hela karstområdets dräneringssystem. Genom att dela upp ett undersökningsområde i mindre enheter och behandla varje enhet enligt ovanstående metodik kan givetvis ytterligare information vinnas och eventuella variationer inom karstlandskapet kan klarläggas.

Sammanfattningsvis kan sägas, på grundval av den höga sluktätheten (1. D_s), den höga källtätheten (2. D_r) och de låga värdena på ytdräneringstätheten (6. D_l), att karstområdet har en hög permeabilitet med ett väl utvecklat underjordiskt dräneringssystem.

Källorna kan grupperas till tre nivåer; $\bar{H}_{ra}$, $\bar{H}_{rb}$ och $\bar{H}_{rc}$. De låga värdena på källkoefficienten (5. V_{hr}) med avseende på nivåerna $\bar{H}_{rb}$

och $\overline{H}_{rc}$ (V_{hrb}, V_{hrc}) antyder att grundvattnet är fast förknippat till dessa nivåer. Värdena på sluk/källkvoten (3. R_{sr}), vilka överstiger värdet 1, tyder på att det subterrana dräneringssystemet som helhet betraktat är av vadös karaktär och saknar en homogent utbildad grundvattenyta. Det kan närmast till formen sägas vara utbildat i likhet med ett normalt ytdräneringsnät. Samtliga källor står emellertid under hydrostatiskt tryck. Att grundvattnet vid källnivåerna $\overline{H}_{rb}$ och $\overline{H}_{rc}$ är intimt förknippade till dessa innebär inte att det finns en sammanhängande och homogen grundvattenyta som, via sprickor och håligheter i berggrunden, sammanbinder källorna på respektive nivåer. Spårförsök antyder snarare att förhållandet är det motsatta. Källornas gruppering till de olika nivåerna torde närmast vara avhängigt berggrundens deformation. Vattnet kommer vid samtliga källor ut ur kalkstenen via skiktfogar, sprickor eller i veckaxelns riktning i samband med små antiklinalveck.

V 5.2. Karstdepressioner

Ytterligare information om karstlandskapet och dess förkarstningsgrad har erhållits genom en analys av de slutna depressionerna (sluk, lösningsdoliner, instörtningsdoliner etc.) vilka inkluderar alla typer av dräneringshål huvudsakligen utbildade genom karstprocesser. Depressionernas spridning framgår av fig. 20.

V 5.2.1. Symboler

C_d = sluten depression
A_{cd} = depressionens yta
L_{cd} = depressionens längd
W_{cd} = depressionens bredd
H_{cd} = depressionens relief (skillnaden mellan dess högsta och lägsta punkt).
R_{de} = längd/bredd förhållandet
l_o = longitudinella axelns orientering
$\overline{Str}$ = kalkstenens genomsnittliga strykning
J_o = sprickorientering
d_s = lösningsdolin
d_c = instörtningsdolin
d_j = sprickdolin

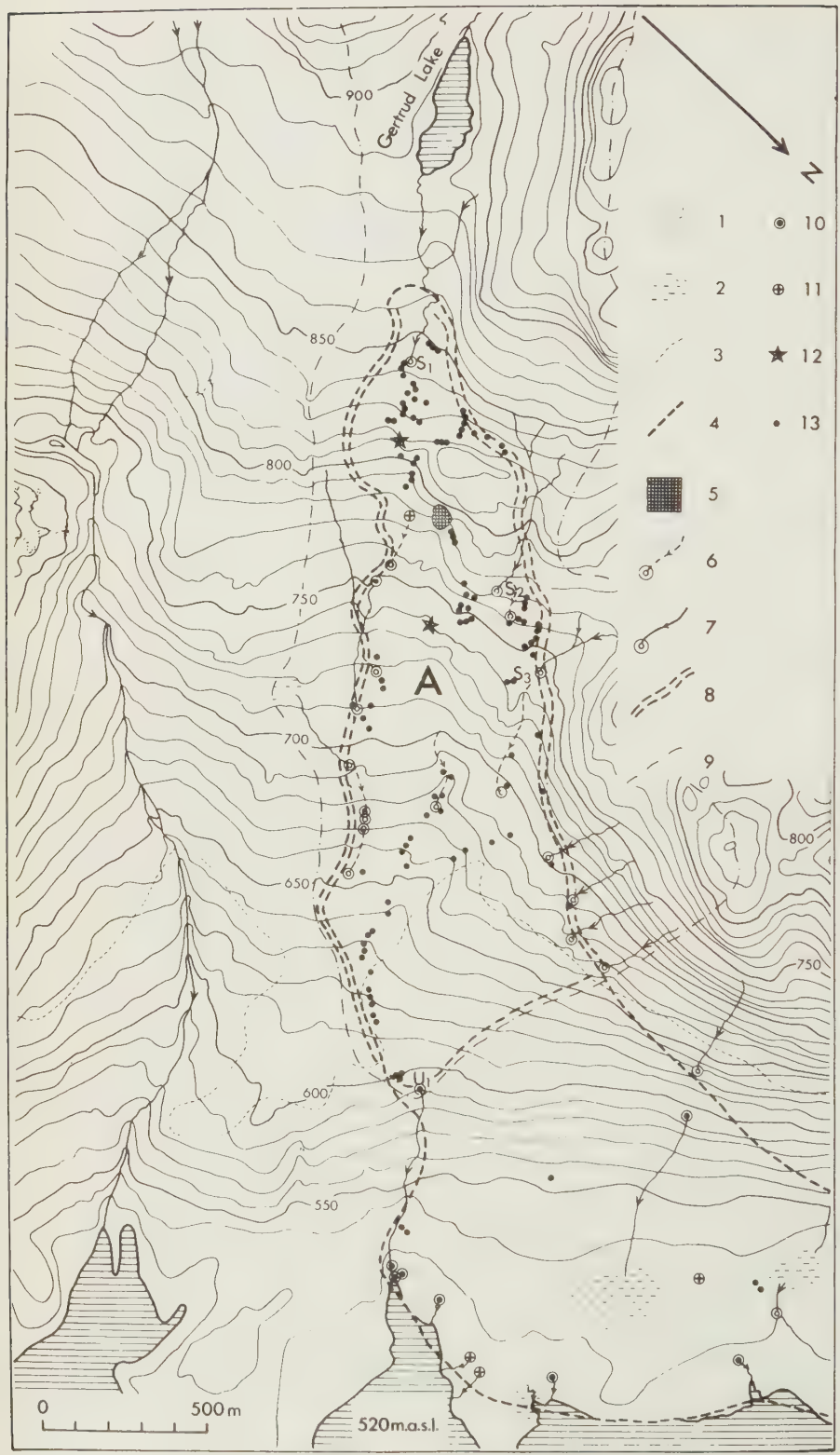


Fig. 20. Artfjällets karstområde (N 66° 01′, E 14° 51′).
1. slukås 2. mosse, sankmark 3. trädgräns 4. kalkstensgräns 5. "Djävulskratern" 6. intermittent bäck med sluk 7. permanent bäck med sluk 8. kalkstensområde 9. A´s dräneringsområde 10. karstkälla 11. intermittent karstkälla 12. fossil karstkälla 13. karstdepression.

Artfjället karst area.
1. engorged esker 2. peat-moss 3. tree-limit 4. limestone border 5. "Devil´s Crater" 6. intermittent stream with swallet 7. permanent stream with swallet 8. limestone area A 9. the drainage area of A 10. karst spring 11. intermittent karst spring 12. fossil karst spring 13. karst depression.

n = antalet observationer
A = kalkstensområdets yta i km^2

Även i detta fall är symbolerna konstruerade på grundval av den engelska terminologin varvid C_d står för "closed depression", A_{cd} för "area of closed depression", L_{cd} för "length of closed depression", W_{cd} för "width of closed depression" etc.

V 5.2.2. Definitioner

1. Genomsnittlig depressionslängd $\overline{L}_{cd} = \frac{\sum L_{cd}}{n}$

2. Genomsnittlig depressionsbredd $\overline{W}_{cd} = \frac{\sum W_{cd}}{n}$

3. Depressionstäthet $D_{cd} = \frac{\sum C_d}{A}$; antalet depressioner per ytenhet.

4. Genomsnittlig depressionsyta $\overline{A}_{cd} = \frac{\sum A_{cd}}{n}$; den ungefärliga yta som i markplanet (horisontalplanet) genomsnittligen upptas av en depression.

5. Genomsnittlig depressionsrelief $\overline{H}_{cd} = \frac{\sum H_{cd}}{n}$

6. Perforeringsindex $R_p = \frac{\sum A_{cd}}{A}$; anger den del av markytan som upptas av depressioner. När R_p går mot 1 är landskapet nästan fullkomligt sönderdelat av depressioner. När R_p går mot noll förekommer depressioner i nästan negligerbar utsträckning.

7. Det genomsnittliga längd/bredd förhållandet $\overline{R}_{de} = \frac{\sum R_{de}}{n}$; är ett mått på depressionernas symmetri. Ju mer $\overline{R}_{de}$ avviker från 1 desto större assymmetri. Värden större än 1 tyder på att depressionerna har större längd än bredd medan värden mindre än 1 tyder på mindre längd än bredd.

8. Orienteringsindex $\overline{R}_{OJ} = \frac{\overline{I}_o}{\overline{j}_o}$; och $\overline{R}_{O.Str} = \frac{\overline{I}_o}{\overline{Str}}$; ger förhållandet mellan depressionernas genomsnittliga längdorientering och berggrundens genomsnittliga sprickorientering respektive berggrundens strykning. Båda index ger ett mått på depressionernas beroende av sprickorientering respektive strykning. Bara sprickor med en längd överstigande 2 m har medtagits. Kalkstenens strykning och sprickorientering tillsammans med orienteringen av

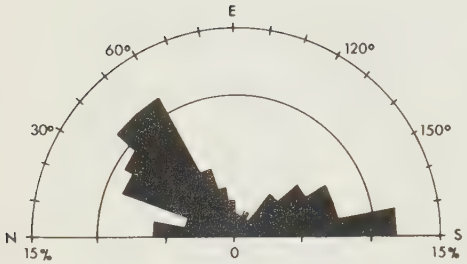


Fig. 21. Orienteringen av berggrundens sprickor i procent av antalet utförda mätningar. Materialet är indelat i 10°-klasser. n=152.
The orientation of the joints in per cent of the number of measurements made. The material is divided into 10°-classes. n=152.
(efter Helldén 1974 a).

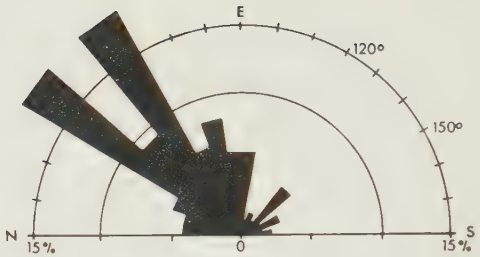


Fig. 22. Orienteringen av de longitudinella axlarna i procent av axlarnas totala längd. Materialet är indelat i 10°-klasser. n=139.
The orientation of the longitudinal axes in per cent of the total length of the axes. The material is divided into 10°-classes. n=139.
(efter Helldén 1974 a).

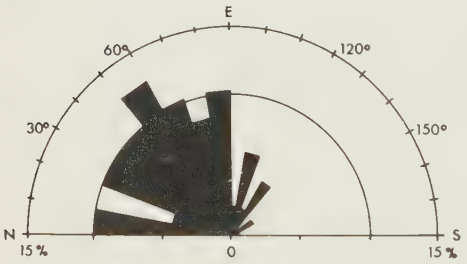


Fig. 23. Orienteringen av de longitudinella axlarna i procent av antalet utförda mätningar. Materialet är indelat i 10°-klasser. n=139.
The orientation of the longitudinal axes in per cent of the number of measurements made. The material is divided into 10°-classes. n=139.
(efter Helldén 1974 a).

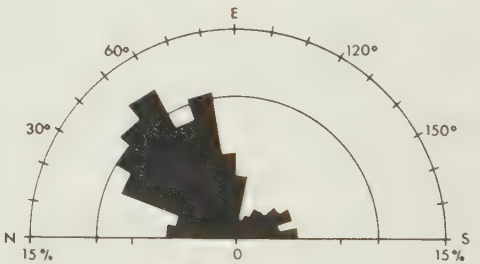


Fig. 24. Kalkstenens strykning i procent av antalet utförda mätningar. Materialet är indelat i 10°-klasser. n=50.
The strike of the limestone in per cent of the number of measurements made. The material is divided into 10°-classes. n=50.
(efter Helldén 1974 a).

depressionernas långaxlar presenteras i rosdiagrammen fig 21-24.

V 5.2.3. Resultat

Tabell 7. Depressionskarakteristika. Sluken har hänförts till respektive depressiontyp. Värdena inom parentes anger standardavvikelsen såvida inte något annat anges.

	d_s	d_j	d_c	$d_s+d_j+d_c$
n	64 (46,0%)	37 (26,6%)	38 (27,4%)	139 (100%)
1. $\overline{L}_{cd}$	8,0m (9,2)	5,0m (2,9)	11,2m (4,3)	8,1m (8,0)
2. $\overline{W}_{cd}$	5,5m (5,2)	2,2m (1,2)	8,1m (4,1)	5,3m (5,8)
3. D_{cd}	26,2/km^2	15,2/km^2	15,6/km^2	57,0/km^2
4. $\overline{A}_{cd}$	53,2 m^2	8,3 m^2	117,4 m^2	58,8 m^2
5. $\overline{H}_{cd}$	1,6m (1,3)	2,1m (2,1)	3,9m (5,4)	2,4m (3,7)
6. R_p	1/716	1/8000	1/547	1/297
7. $\overline{R}_{de}$	1,4 (0,6)	2,8 (2,2)	1,5 (0,5)	1,8 (1,3)
8. $\overline{R}_{0J}$	0,84	0,80	0,77	0,81
$\overline{R}_{0.Str}$	1,32	1,25	1,21	1,27

V 5.2.4. Sammanfattning

Landskapet är karstifierat i hög grad med en hög depressionstäthet. Storleken på depressionerna är emellertid liten i jämförelse med karstlandskap på sydligare latituder. De låga värdena på den genomsnittliga depressionsytan (4. $\overline{A}_{cd}$) resulterar i låga värden på perforeringsindex (6. R_p), en faktor som i hög grad är beroende av förkastningsintensitet, landskapets ålder och den tid under vilken karstprocesserna kunnat verka.

Instörtningsdolinerna intar genom sin storlek en särställning i landskapet. Deras längdaxelorientering tycks, tillsammans med sprickdolinerna,i högre grad än övriga depressioner vara beroende av kalkstenens strykning. Sambandet mellan depressionernas längdaxelorientering och berggrundens strykning respektive sprickorientering är, vilket framgår av orienteringsindex (8. $\overline{R}_{0J}$, $\overline{R}_{0.Str}$) och rosdiagrammen (fig. 21-24) mycket gott.

V 5.3. Karren

Ungefär 80% av karrenfårorna i området har uppmätts varvid nedan-

stående medelvärden erhållits (tab 8). Materialet har vidare uppdelats i längd-, bredd-, djup- och stupningsklasser. Karrenfårornas variationer med avseende på dessa faktorer framgår av fig 25-26.

Tabell 8. Karrenfårornas genomsnittliga längd, bredd, djup och stupning. Värdena inom parentes anger standardavvikelsen.

n = 97		
Längd	0,58m	(0,32)
Bredd	0,16m	(0,07)
Djup	0,04m	(0,04)
Stupning	46°	(21,7)

Någon korrelation mellan karrenfårornas stupning å ena sidan och deras längd, bredd eller djup å den andra har inte kunnat erhållas.

V 5.4. Karst i arktisk miljö kontra karst i tempererad och tropisk miljö. Diskussion och jämförelser.

Då antalet presenterade karstmorfometriska undersökningar är mycket få finns det ännu inget jämförelsematerial från karstområden med arktiskt eller subarktiskt klimat. För att erhålla en uppfattning om i vilken grad Artfjällets karstområde skiljer sig från karstområden i andra miljöer presenteras nedan en sammanställning av några karstparametrar dels från ett karstområde i Ingleborough-distriktet, Yorkshire, England (Williams 1969) och dels från ett tropiskt bergskarstområde i Mt. Kaijende i Nya Guinea (Williams 1971,1972 a) (tab. 9-10). Williams resultat bygger huvudsakligen på morfometriska analyser av kart- och flygbildsmaterial.

Tabell 9. Några jämförande karstparametrar från Artfjället och England (Williams 1969) med avseende på dräneringssystemet.

	Artfjället	England
Karstområdets yta A	2,4 km^2	31,2 km^2
Sluktäthet D_s	8,2/km^2	2,95/km^2
Källtäthet D_r	6,1/km^2	2,53/km^2
Sluk/källkvoten R_{sr}	1,5	1,12
Kortaste underjordiska genomsnittliga flödesavståndet $\bar{L}_u$	1,1 km	0,58 km
Källkoefficienten V_{hr}	18,6	12,5
Dräneringstäthet på kalksten D_l	0,6 km/km^2	1,5 km/km^2

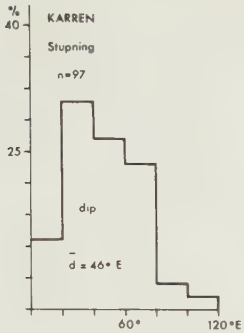


Fig. 25. Karrenfårornas variation i stupning i procent av antalet utförda mätningar. Stupningen är indelad i 20°-klasser. n=97.
The variation in dip, of the karren furrows, in per cent of the number of measurements made. The dip is divided into 20°-classes. n=97.
(efter Helldén 1974 a).

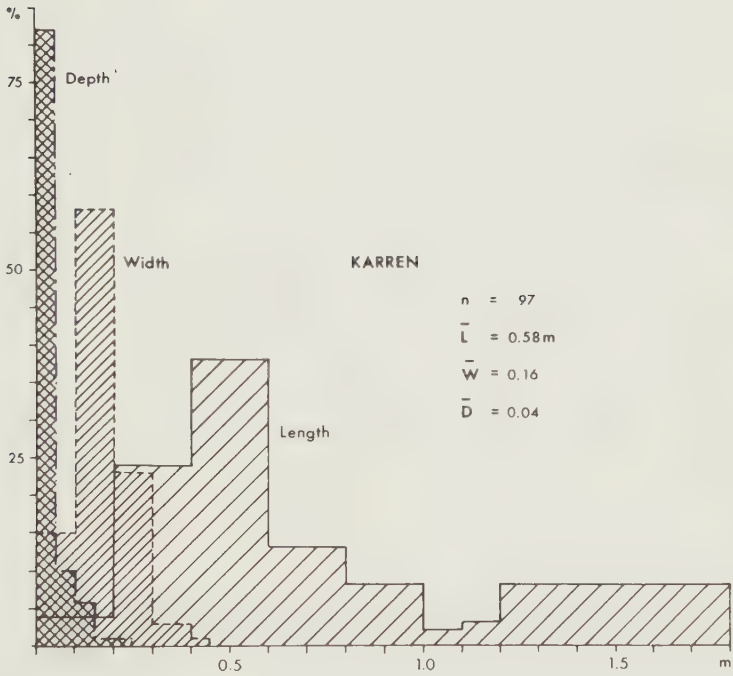


Fig. 26. Karrenfårornas variation i djup, längd och bredd i procent av antalet utförda mätningar. n=97.
The variation of the karren furrows in depth, length and width in per cent of the number of measurements made. n=97.
(efter Helldén 1974 a).

För Artfjällets del har fossila källor och intermittenta sluk tagits med i beräkningarna. Hur Williams behandlat sitt material i detta avseende framgår inte. Värdena på parametrarna, med en indelning i permanenta, intermittenta och fossila förekomster har tidigare presenterats i tab. 5. Williams värden för karstområdet i England var ursprungligen angivna i miles och square miles. Dessa har omräknats till km och km^2.

Ur tabell 9 framgår att Artfjällets karstområde, i jämförelse med Ingleboroughdistriktets, har en högre permeabilitet med ett föga utvecklat ytdräneringssytem och ett väl utvecklat underjordiskt dräneringssystem vilket påvisas av de högre värdena på sluktätheten (D_s), källtätheten (D_r), kortaste genomsnittliga underjordiska flödesavståndet ($\bar{L}_u$) och den lägre dräneringstätheten (D_l). De lägre värdena på sluk/källkvoten (R_{sr}) och källkoefficienten (V_{hr}) i Ingleboroughdistriktet ger en antydan om att det underjordiska dräneringssystemet i högre grad än i Artfjället kan vara av freatisk karaktär med en utbildad mer eller mindre sammanhängande grundvattenyta (pietzometrisk grundvattenyta). Åsikten att det verkligen existerar grundvattenytor, om än mycket oregelbundna, inom större eller mindre områden i Ingleboroughdistriktet har, efter morfologiska analyser av grott- och dalnivåer, framförts av bl.a. Sweeting (1950) och Warwick (1960, 1964). I andra arbeten påpekas emellertid att berggrundens struktur kan ha haft större inflytande på utbildandet av grottsystem på olika nivåer än en eventuellt existerande grundvattenyta (Waltham 1970).

Tabell 10. Några jämförande karstparametrar från Artfjället, England (Williams 1969) och Nya Guinea (Williams 1971, 1972 a) med avseende på slutna depressioner.

	Artfjället	England	Nya Guinea
Ungefärlig h.ö.h.	750 m	300 m	2900 m
Karstområdets yta A	2,4 km^2	31,2 km^2	13,2 km^2
Antalet depressioner C_d	139	95	172
Depressionstäthet D_{cd}	57,0/km^2	3,0/km^2	13,05/km^2
Genomsnittlig depressionsyta $\bar{A}_{cd}$	$58,8 \cdot 10^{-6} km^2$	$13 \cdot 10^{-4} km^2$	0,77km^2
Perforeringsindex R_p	1/297	1/2500	1/1

Av tabell 10 framgår att depressionstätheten (D_{cd}) på Artfjället vida överträffar de värden som presenteras för Ingleborough och den tropiska karsten i Nya Guinea. Artfjällsområdet skiljer sig också markant från de båda andra genom ett utomordentligt lågt värde på den genomsnittliga depressionsytan ($\bar{A}_{cd}$). Perforeringsindex (R_p), vilket anger hur stor del av hela landskapsytan som upptas av depressioner, ger en god bild av landskapets förkarstning. Index för det tropiska karstområdet i Nya Guinea har av Williams (1971) satts till 1,0 vilket innebär att hela området upptas av depressioner (cockpits). Värdena för Artfjället och framför allt Ingleborough är avsevärt lägre vilket för det förra områdets del beror på små depressionsytor och för det senares del på ett relativt lågt antal depressioner. Det skall emellertid påpekas ytterligare en gång att Williams gjort sina analyser på grundval av mätningar på kartor och flygbilder medan mätningarna på Artfjället utförts i fält. Alla depressioner av små dimensioner har därför av naturliga skäl uteslutits från Williams analyser varför värdena på depressionstäthet (D_{cd}) och perforeringsindex (R_p) skulle bli något högre medan den genomsnittliga depressionsytan skulle blivit mindre om dessa depressioner hade kunnat medtagas i analysen. Detta gäller huvusakligen Ingleboroughdistriktet eftersom depressioner av små dimensioner i det tropiska karstområdet troligen är så fåtaliga att de inte kunnat påverka de redovisade värdena i någon nämnbar omfattning.

På grundval av de gjorda jämförelserna kan man konstatera att Artfjällets karstområde, trots att det är beläget i ett klimatområde av typen ET, på intet sätt kan sägas vara i avsaknad av ytkarst. Tvärtom är landskapet i jämförelse med t.ex. Ingleboroughdistriktet i hög grad karstifierat vilket i viss mån står i motsatsförhållande till de åsikter som framförts av bl.a. Corbel (1957, 1960), Bögli (1960) och Sweeting (1972) vilka anser att arktisk och subarktisk karst kännetecknas av bl.a. föga utvecklad ytkarst.

V 6. HYDROLOGI

V 6.1. Metodik

Vattenprover insamlades under perioden juni-augusti 1971 en eller två gånger om dagen vid utloppet U_1 och sluken S_1 och S_2. Samma

år togs vattenprover vid utloppet U_1 en gång om dagen under maj månad samt under en vecka i december. Samtidigt med vattenprovernas insamlande uppmättes vattentemperatur och vattenstånd. Senare korrelerades vattenstånd med vattenföring vilken registrerats med flygel. För att undvika CO_2 diffusion mellan proverna och atmosfären förvarades dessa i E-kolvar av glas tillslutna med gummiproppar och analyserades inom en timma i ett laboratorium installerat vid Sotsbäcksgrottans ingång (S_1).

De kemiska analyserna utfördes i avsikt att bestämma vattnets pH samt koncentration av Mg^{+2} + Ca^{+2} (totalhårdheten), HCO_3^-, CO_3^- och CO_2. Den totala hårdheten bestämdes genom komplexometrisk titrering med EDTA och Eriochromsvart T. HCO_3^-, CO_3^{-2} och CO_2 halterna kunde beräknas enligt Karlgrens (1962) metod efter alkalinitetstitrering med 0,02 N HCl och SBV-indikator (Karlgren 1962, metod 1). I stället för att genomlufta provet med N_2-gas användes CO_2- fri luft. Denna producerades genom att med hjälp av en cykelpump leda luft genom ascaritfyllda glasrör i vilka ascariten absorberade all CO_2. Vid beräkning av HCO_3^-, CO_3^{-2} och fria CO_2 halterna används enligt Karlgrens metod dissociationskonstanterna $K_1 = 3{,}98 \cdot 10^{-7}$ och $K_2 = 4{,}2 \cdot 10^{-11}$ där K_1 och K_2 är kolsyrans första och andra dissociationskonstanter (se sid 21). De beskrivna titreringsmetodernas standardavvikelse, efter titrering mot standardlösningar, har beräknats till 0,05 mekv/l. Vid mätandet av pH har en bärbar ackumulatordriven pH-meter, av märket Metrohm E 488, med en kombinerad glaselekrod, av typ EA 152 X, använts.

Vattnets aggressivitet har åskådliggjorts genom att utnyttja den s.k. Trombes kurva (Trombe 1952) senare modifierad av bl.a. Jacobson och Langmuir (1972). Kurvan visar förhållandet mellan pH och koncentrationen Ca^{+2}, uttryckt i mg $CaCO_3$/l, för en mättad kalcitlösning vid +10° C. Både Trombes och Jacobson & Langmuirs kurvor redovisas (fig. 34).

För att fastställa det underjordiska sambandet mellan olika sluk och källor samt för att erhålla en uppfattning om det underjordiska dräneringssystemets karakteristika genomfördes fyra spårförsök med det fluoroscerande spårämnet Rhodamin B. Ett kilogram spårämne användes vid varje försök. Efter det att spårämnet, löst i T-sprit, hällts ut i något av sluken togs vattenprover med korta tidsintervaller vid utloppen. Då Rhodamin B är känsligt för ultra-

violett strålning förvarades vattenproverna i provrör omsvepta med staniolpapper. Analysering av provernas Rhodaminhalt skedde två månader senare i en Aminco-Bowman Spectrophotofluorometer.

För samtliga figurer med tidsskala gäller att denna är relativ om inte annat anges. Observationerna, vilka utförts en till två gånger om dagen, är markerade i löpande följd med samma avstånd mellan varje trots att tidsluckor på upp till två dagar kan förekomma inom en och samma observationsserie. Både den totala hårdheten och karbonathårdheten är uttryckt i mg $CaCO_3$/l (p.p.m. $CaCO_3$).

Det undersökta dräneringsområdets utbredning framgår av figur 9. Ytan = 3,68 km^2

V 6.2. Vattenföring

Vattenföringen vid de två sluken S_1 och S_2 samt vid utloppet U_1 framgår av figur 27. Utloppet U_1, vilket ensamt svarar för uppskattningsvis 75-80% av samtliga utlopps vattenflöden, har en beräknad årsmedelvattenföring på 105 l/s och avger vatten under hela året. Under den veckolånga mätningsperioden i december 1971, efter mer än en månads frost, uppmättes en genomsnittlig vattenföring på 50 l/s. Genomsnittet för perioden september-april har uppskattats till 25 l/s vilket anses vara ett minimivärde. Större delen av vinterflödet är orsakat av den snö och issmältning som äger rum i kontakten mellan den relativt varma grottatmosfären och nollisotermen.

Under snösmältningsperioden i slutet av maj och början på juni kan ända upp till 60% av vattenflödet vid U_1 bestå av infiltrationsvatten. Detta värde avtar snabbt och i början av augusti utgör det bara en eller två procent av utflödet. Resterande procent utgörs av det alloktona vatten som går in i den subterrana cirkulationen vid sluken S_1, S_2 och S_3.

V 6.3. Spårförsök

Spårförsöken visade att både S_1, S_2 och S_3 stod i förbindelse med utloppet U_1 (fig. 9). Adsorptionen av spårämnet på lera, humuspartiklar och kalksten har visat sig kunna vara avsevärd under vissa betingelser (Knutsson 1970). En hydrogeologisk undersökning av ett karstområde vid Björkliden i Lappland visade att Rhodamin B förse-

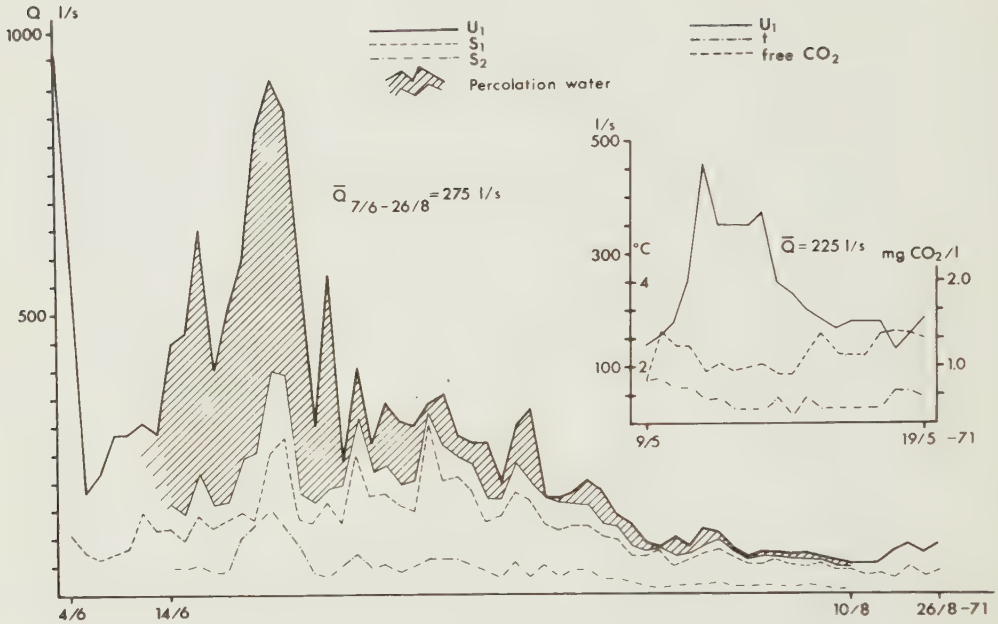


Fig. 27. Vattenföringen vid sluken S_1 och S_2 samt vid karstkällan U_1. Under snösmältningsperioden i slutet av maj och början av juni utgöres upp till 60% av flödet vid U_1 av infiltrationsvatten. Det infällda diagrammet visar vattenföring, vattentemperatur och fri CO_2 koncentration vid karstkällan U_1 under perioden 9-19 maj, 1971.

The water discharge at the swallets S_1 and S_2 and at the karst spring U_1. In the snow melting period at the end of May and the beginning of June up to 60% of the outflow at U_1 consists of percolation water. The inserted diagram shows water discharge, water temperature and free CO_2 concentration at karst spring U_1 during the period 9-19 May, 1971.

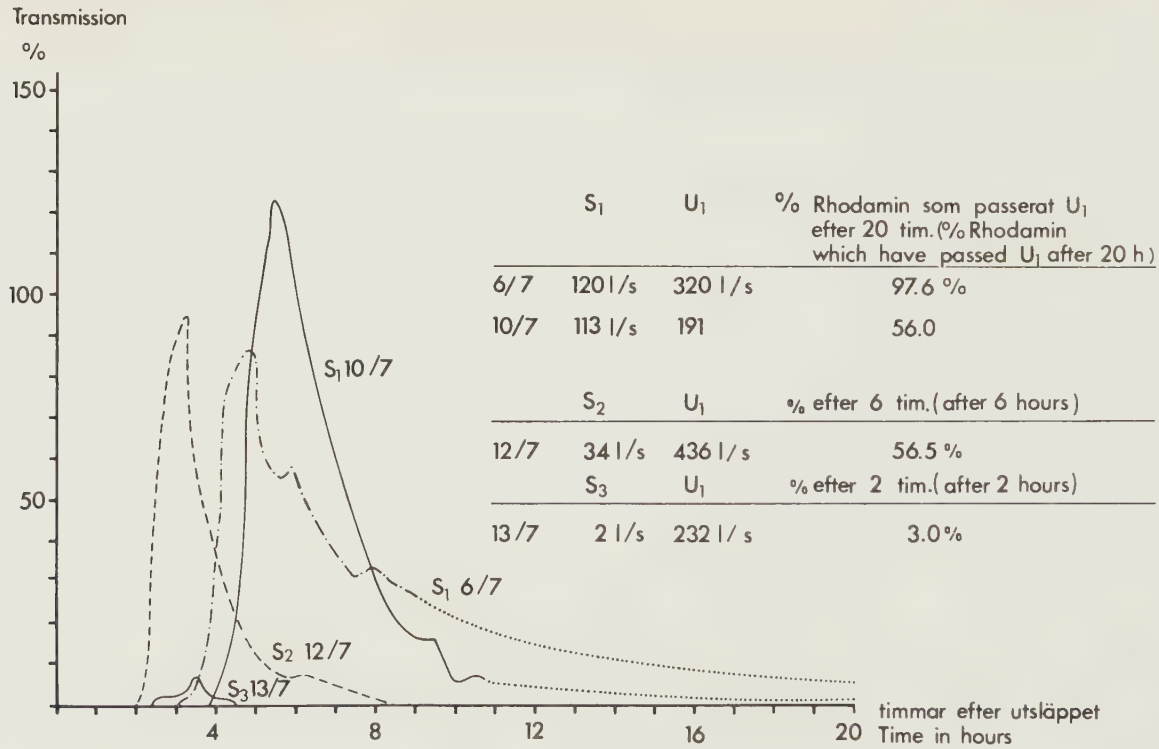


Fig. 28. Variationen i transmission vid karstkällan U_1 i förhållande till tidsförloppet efter det att spårämnet släppts i vid sluken S_1, S_2 och S_3. Proverna är tagna med 15-30 minuters intervall. De prickade linjerna anger kurvornas förmodade förlopp efter det att provtagningen upphört.

The changes in transmission at the karst spring U_1 in relation to time lapse after dropping the tracer into the swallets S_1, S_2 and S_3. The samples are drawn with an interval of 15-30 minutes; the sampling is finished. (efter Helldén 1974 a).

nades något i jämförelse med radioisotopiska spårämnen (Knutsson et al. 1967). Denna försening kan eventuellt förklaras av det faktum att Rhodaminet bara spårats genom okulära besiktningar varför stora mängder av färgämnet kunnat passera obemärkt i starkt utspädd koncentration.

Adsorptionen vid de på Artfjället genomförda experimenten varierade mellan 0,4 och 97% av den mängd Rhodamin som släppts i vid sluken. Två experiment utfördes vid sluket S_1 vid olika vattenföring (fig. 28). Vid en vattenföring vid utloppet U_1 på 320 l/s och vid sluket S_1 på 120 l/s nådde färgämnet U_1 efter tre timmar. Efter 20 timmar hade 97,6% av spårämnet passerat. Minsta avståndet mellan sluk (S_1) och utlopp (U_1), 2 200 m, innebär att vattnet i underjorden rört sig med en medelhastighet på 0,23 m/s. Detta är ungefär hälften av den hastighet vattnet hade innan det nådde sluket.

Vid en vattenföring på 191 l/s vid U_1 och 113 l/s vid S_1 var motsvarande värden 4 timmar, 56% och 0,17 m/s. Även i detta fallet var den underjordiska vattenhastigheten ungefär hälften av den hastighet vattnet hade innan det nådde sluket. Skillnaden i adsorption mellan de två försöken kan delvis bero på det faktum att varje liter vatten vid den lägre vattenföringen har en större ytkontakt med sin omgivning än vad varje liter vatten har vid en högre vattenföring. Lägre vattenföring ger också högre koncentration av spårämnet samt lägre vattenhastighet vilket innebär att förhållandevis mer av Rhodaminet kan adsorberas av sediment och tunnelväggar.

De två små sekundära maxima som kan observeras på varje kurva för S_1 kan vara orsakade av mindre förgreningar i det underjordiska dräneringsmönstret.

Om man antar att vattnet i underjorden rör sig med samma medelhastighet som på ytan skulle dräneringsvägen mellan S_1 och U_1 bli inte mindre än 5 400 meter.

De höga adsorptionsvärdena för S_2 och S_3 kan förklaras av de små vattenföringsvärdena vid sluken och av föga utvecklade subterrana dräneringskanaler, vilka ger ökad ytkontakt med vattnet och därmed höjda adsorptionsvärden.

V 6.4. Vattnets fysikaliska egenskaper

Vattnet är kristallklart vid alla vattenföringar vid samtliga sluk

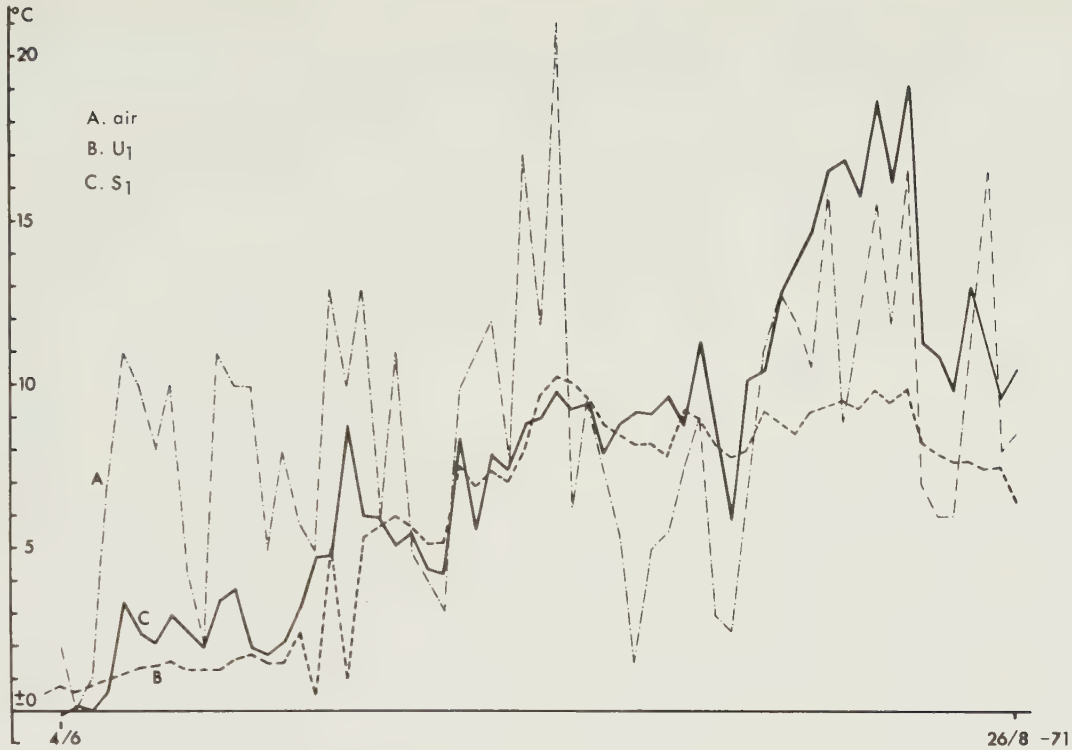


Fig. 29. Vattentemperaturens fluktuationer under mätningsperioden vid S_1 och U_1. A =lufttemperaturen vid S_1. B =vattentemperaturen vid U_1. C =vattentemperaturen vid S_1.

The fluctuations in temperature during the measuring period at S_1 and U_1. A =air temperature at S_1. B =water temperature at U_1. C =water temperature at S_1.

och källor. Vissa delar av Sotsbäcksgrottans fossila delar uppvisar mäktiga strierade sandlager, vilka visar att sedimenttransporterande vattenflöden tidigare runnit fram genom delar av det subterrana dräneringssystemet. De sedimentförande delarna är belägna mer än 10 m över de tunnlar som nu dräneras av vatten varför det är uteslutet att sandlagren skulle ha kunnat sedimenterats under högvatten.

Vattentemperaturens fluktuationer under mätningsperioden vid S_1 och U_1 framgår av figur 29. Under snösmältningen på våren antar vattnet vid utloppet U_1 en minimitemperatur på +0,5° C, vilken långsamt stiger under sommarmånaderna för att i augusti ha uppnått till +10° C. Under den första veckan i december var genomsnittstemperaturen vid U_1 +2,6° C för en lufttemperatur på -2,0° C för mätningar utförda klockan 1300.

Temperaturvariationerna vid utloppet är intimt förknippade med de vid inloppet S_1. Under sommaren har grottsystemet en avkylande effekt på det ytvatten som slukas under dagen och en uppvärmande effekt under natten samtidigt som ytvattentemperaturens fluktuationer dämpas.

V 6.5. Vattnets kemiska egenskaper

Det har inte i något fall visat sig vara möjligt att korrelera vattnets fria koldioxidhalt med vare sig vattentemperatur eller vattenföring. Det föreligger emellertid en avtagande CO_2 tendens under mätningsperioden samtidigt som vattenföringen avtar och vattentemperaturen stiger. Trots att vatten vid 0° C och ett partialtryck på 0,0003 atm bara kan lösa 1,01 mg CO_2/l (Bögli 1960) är värden överstigande 1,5 mg CO_2/l inte ovanliga under den intensiva snösmältningen i början på juni. Detta gäller framförallt för sluket S_1. Variationerna i pH, HCO_3^-, CO_2 och karbonathårdhet för S_1 och U_1 framgår av figur 30. Karbonathårdheten, som är angiven i mg $CaCO_3$/l (p.p.m.), överstiger aldrig 55 mg $CaCO_3$/l. pH vilket varierar mellan 7,0 och 8,5 ger mycket låga CO_3^{-2} koncentrationer. Det högsta värdet, 0,46 mg/l, noterades i december tillsammans med pH 8,25 och vattenföringen 45 l/s.

Den icke-alkalina hårdheten (total hårdhet-alkalin hårdhet) är vanligen lägre än 0,2 mekv/l. På grund av de låga värdena presenteras

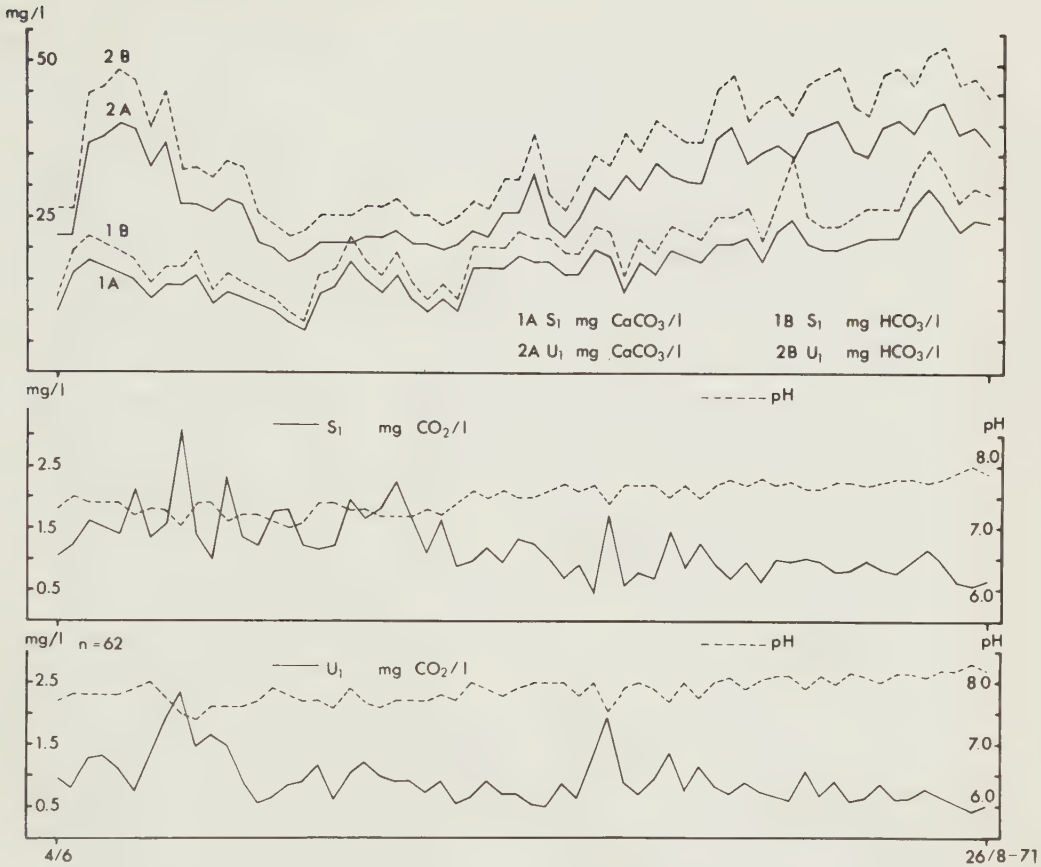


Fig. 30. Variationerna i pH, HCO_3^- , fri CO_2 och karbonathårdhet vid sluket S_1 och karstkällan U_1. Karbonathårdheten är uttryckt i mg $CaCO_3$/l. Koncentrationen av $CaCO_3$ och HCO_3^- samt pH-värdet ökar under perioden medan den fria CO_2 halten minskar. Under samma period minskar vattenföringen och ökar vattentemperaturen (se fig. 27 och 29).
The fluctuations of pH, HCO_3^-, free CO_2 and carbonate hardness at swallet S_1 and karst spring U_1. Carbonate hardness is expressed in mg $CaCO_3$/l. The concentration of $CaCO_3$ and HCO_3^- and the pH value increase during the period, while the free CO_2 content decreases. During the same period the water discharge decreases and the water temperature increases (see fig. 27 and 29).

varken CO_3^{-2} koncentration eller den icke-alkalina hårdheten. En sammanställning av analysdata ges i bilaga 1-2.

Förhållandet mellan karbonathårdheten i mg $CaCO_3$/l och vattenföringen för sluken S_1 och S_2 samt utloppet U_1 framgår av figurerna 31-33, där förhållandet mellan $CaCO_3$ transport, uttryckt i g $CaCO_3$/s, och vattenföring också finns angivet.

Karbonathårdheten är omvänt beroende av vattenföringen. Förhållandet kan beskrivas med funktionen $y = ax^b$, där faktorerna a och b i första hand tycks vara beroende av variationerna i vattentemperatur och av dräneringssystemets karakteristika. Det visar sig att mycket små förändringar i vattenföringen, vid låg vattenföring, ger upphov till stora förändringar i karbonathårdheten. Observationerna vid S_1 och U_1 har indelats i temperaturklasser. Korrelationskoefficienterna överstiger aldrig värdet -0,83.

Vid utloppet U_1 (fig. 31) ger det lägre temperaturintervallet högre värden på y än det högre temperaturintervallet för samma vattenföring. Förhållandet är mer accentuerat vid högre vattenföring än vid lägre. De högre koncentrationerna vid lägre temperaturer beror troligen på vattnets större förmåga att vid låga vattentemperaturer lösa mer CO_2, och därmed mer $CaCO_3$, än vid högre för samma vattenföring (Bögli 1960).

Vid S_2 har något samband mellan vattentemperatur och karbonathårdhet inte kunnat erhållas på grund av att variationerna i temperatur för en och samma vattenföring är för små (fig. 32). De låga temperaturerna är bundna till de höga vattenföringsvärdena under snösmältningsperioden medan de höga vattentemperaturerna vanligen är bundna till låga vattenföringsvärden. Temperaturernas effekt motverkas således av den motsatta inverkan som vattenföringen har på karbonathårdheten.

Förhållandet mellan karbonathårdhet och vattenföring vid S_1 är mer komplicerade (fig. 33). Då vattenföringen överskrider 90 l/s förhåller det sig på det viset att prover som tillhör den lägsta temperaturklassen ger de lägsta y-värdena medan den högsta temperaturklassen antar de högsta y-värdena. Förhållandet blir mer accentuerat med ökad vattenföring. Vid S_1 har vattnet varit i kontakt med kalksten bara under en mycket kort sträcka varför de nämnda förhållandena ger en antydan om att reaktionshastigheten mellan

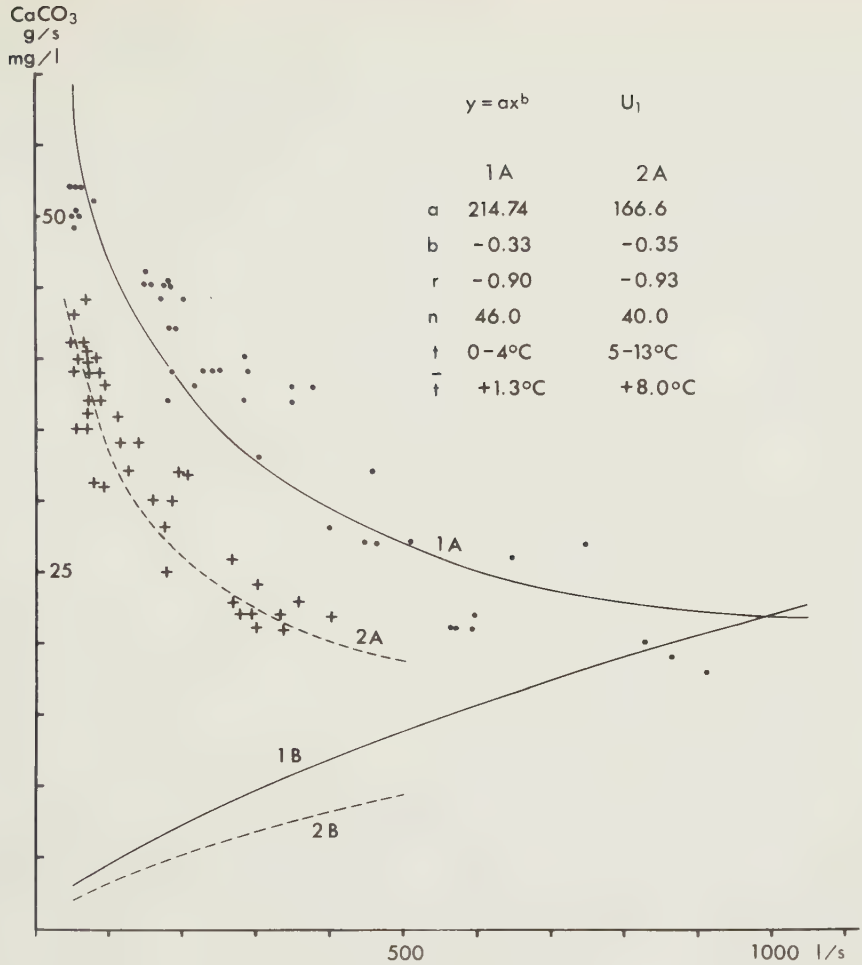


Fig. 31. 1 A och 2 A illustrerar förhållandet mellan karbonathårdhet (uttryckt i mg $CaCO_3/l$) och vattenföring för temperaturintervallen t, med medeltemperaturerna $\bar{t}$, vid karstkällan U_1. Förhållandet beskrivs med funktionen $y=ax^b$, där faktorerna a och b i första hand tycks vara beroende av variationerna i vattentemperatur och av dräneringssystemets karakteristika. n anger antalet utförda analyser och r är lika med korrelationskoefficienten. 1 B och 2 B visar förhållandet mellan transport och vattenföring. Kurvorna är konstruerade på basis av 1 A och 2 A.

1 A and 2 A illustrate the relationship between carbonate hardness (expressed in terms of mg $CaCO_3/l$) and water discharge for the water temperature intervals t, with the mean temperature $\bar{t}$, at karst spring U_1. The relationship is described by means of the function $y=ax^b$, where the factors a and b seem to be dependent on water temperature and the characteristics of the drainage system. n notes the number of observations and r the coefficient of correlation. 1 B and 2 B show the relationship between transport and water discharge. The curves are constructed on the basis of 1 A and 2 A.

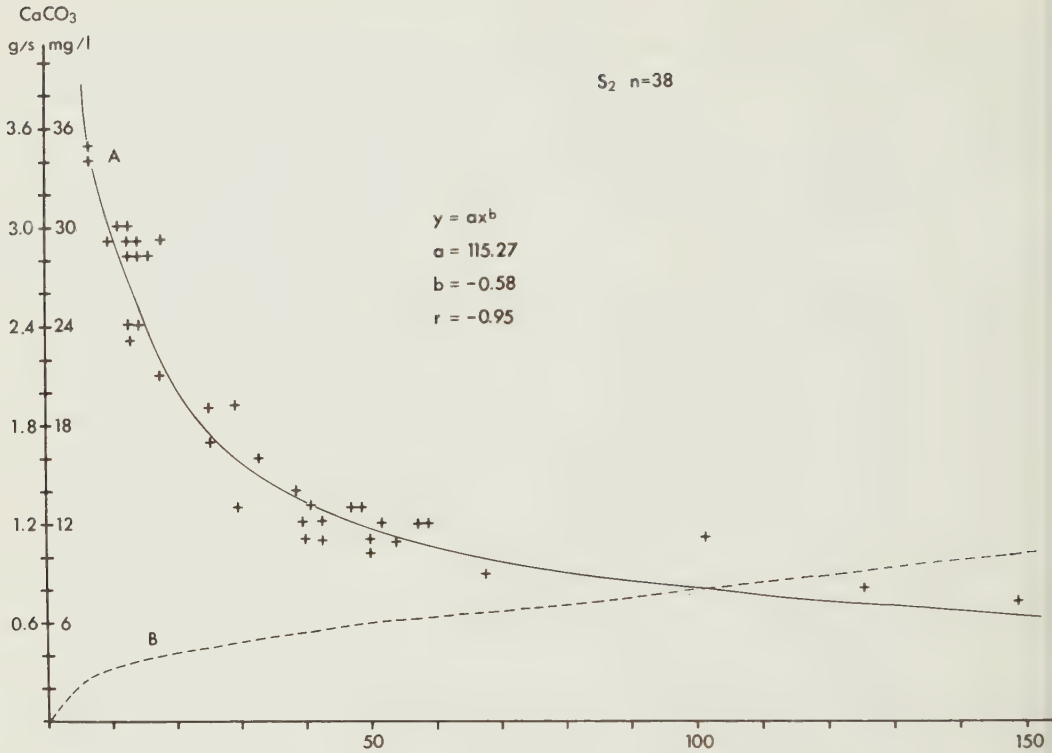


Fig. 32. A illustrerar förhållandet mellan karbonathårdhet (uttryckt i mg $CaCO_3/l$) och vattenföring vid sluket S_2. Förhållandet beskrivs med funktionen $y=ax^b$, där faktorerna a och b i första hand tycks vara beroende av dräneringssystemets karakteristika. n anger antalet utförda analyser och r är lika med korrelationskoefficienten. Kurvan B illustrerar förhållandet mellan transport och vattenföring och är konstruerad på basis av A.

A illustrate the relationship between carbonate hardness (expressed in mg $CaCO_3/l$) and water discharge at swallet S_2. The relationship is described by means of the function $y=ax^b$, where the factors a and b seem to be dependent on the characteristics of the drainage system. n denotes the number of analyses carried out and r the coefficient of correlation. Curve B illustrate the relationship between transport and water discharge. The curve is constructed on the basis of A.

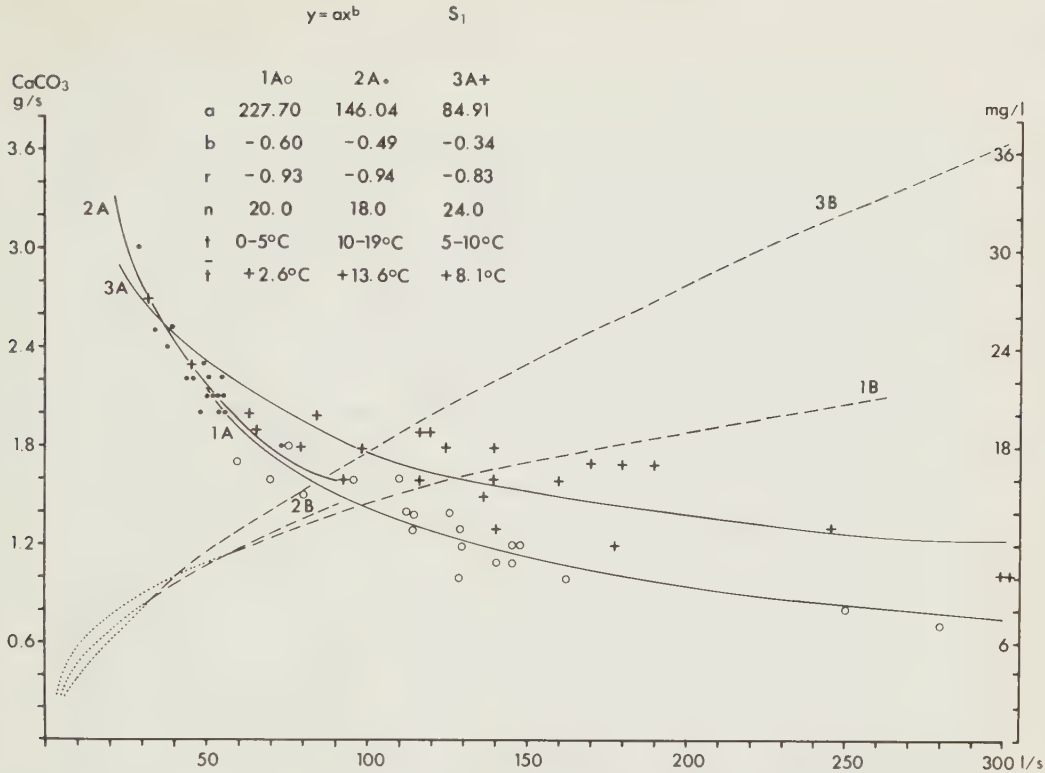


Fig. 33. 1A, 2 A och 3 A illustrerar förhållandet mellan karbonathårdhet (uttryckt i mg $CaCO_3$/l) och vattenföring för temperaturintervallen t, med genomsnittliga vattentemperaturerna $\bar{t}$, vid sluket S_1. Förhållandet beskrivs med funktionen $y=ax^b$, där faktorerna a och b tycks vara beroende av vattentemperatur och dräneringssystemets karakteristika. n anger antalet utförda analyser och r är lika med korrelationskoefficienten. 1 B-3 B visar förhållandet mellan transport och vattenföring. Kurvorna är konstruerade på basis av 1 A-3 A.

1 A, 2 A and 3 A illustrate the relationship between carbonate hardness (expressed in terms of mg $CaCO_3$/l) and water discharge for the temperature intervals t, with the mean water temperatures $\bar{t}$. The relationship is described by means of the function $y=ax^b$, where the factors a and b seem to be dependent on water temperature and the characteristics of the drainage system. n denotes the number of observations and r the coefficient of correlation. 1 B-3 B show the relationship between transport and water discharge. The curves are constructed on the basis of 1 A-3 A.

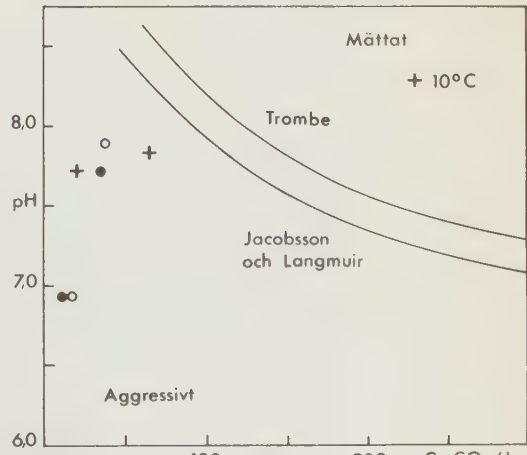


Fig. 34. Lösligheten av kalcit i rent vatten vid +10°C uttryckt i pH och Ca^{+2}-jonkoncentration efter Trombe (1952) och Jacobson&Langmuir (1972). De registrerade värdena utgör högsta och lägsta totalhårdhetsvärden för sluken S_1, S_2 och S_3 samt för utloppet U_1. Samtliga prover visar sig vara aggressiva.

The solubility of calcite in pure water at 10°C in terms of pH and Ca^{+2}ion concentration from Trombe (1952) and Jacobson&Langmuir (1972). The plotted values are highest and lowest values of total hardness from the swallets S_1, S_2 and S_3 and from the karst spring U_1. All

vattnet och kalkstenen, vilken tilltar med ökad temperatur, är förhållandevis av större betydelse än vattnets förmåga att lösa CO_2. I intervallet 30-90 l/s upptar kurvan 2 A en besvärlig mellanställning. Trots att den tillhör det högsta temperaturintervallet har den sitt läge mellan 1 A och 3 A. Med anledning av de framförda argumenten borde den varit placerad överst. Spridningen av observationerna i y-led är för liten för att några tillförlitliga slutsatser skall kunna dragas. En tänkbar förklaring till kurvans läge är att det temperaturintervall som den representerar är så högt att vattnets CO_2 halt reducerats i en sådan utsträckning att den högre reaktionshastigheten mellan vattnet och kalkstenen inte är tillräcklig för att ge högre koncentrationer.

Vid en vattenföring på ca 25 l/s skär kurvorna varandra. För lägre vattenföring tycks karbonathårdheten i första hand vara beroende av vattnets CO_2 halt varvid det lägsta temperaturintervallet ger de högsta koncentrationerna för samma vattenföring. Även i detta fall intager kurvan 2 A en mellanställning trots att den borde varit belägen underst.

Förhållandet mellan totalhårdhet och vattenföring är detsamma som mellan karbonathårdhet och vattenföring med den skillnaden att kurvorna förskjuts ca 5 mg uppåt i y-led i det första fallet.

Av figur 34 framgår att vattnet vid sluken S_1, S_2 och S_3 samt vid utloppet U_1 alltid är aggressivt dvs. har överskott på fri CO_2. Orsaken till att vattnet aldrig hinner mättas på $CaCO_3$ är dels de relativt låga vattentemperaturerna vilka ger låga reaktionshastigheter mellan vattnet och berggrunden och dels den stora nivåskillnaden mellan sluk och utlopp (250 m mellan S_1 och U_1) vilken ger höga vattenhastigheter.

V 6.5.1. Kemiska analysresultat från karstvatten i skilda klimatområden. Diskussion och jämförelser.

Liknande förhållanden mellan hårdhet och vattenföring har presenterats från karstområden i Tjeckoslovakien, USA, Jugoslavien och England av bl.a. Štelcl et al. (1969), Thrailkill (1968), Gams (1972) och Newson (1972). Något samband mellan hårdhet och vattentemperatur enligt ovanstående presentation har emellertid inte kunnat påvisas av de nämnda författarna. Douglas (1968) har undersökt

förhållandet mellan totalhårdhet och vattenföring i ett antal vattendrag i Malaysia, Australien, USA och England och funnit, med vissa undantag, att det föreligger en negativ korrelation mellan de båda faktorerna. Ingen av korrelationskoefficienterna är högre än -0,7. Den goda korrelationen förklaras av att den ytvattentillrinning som ger upphov till en ökning av vattenföringen innehåller mindre mängder löst $CaCO_3$ än det grundvatten som är ansvarigt för vattendragets basvattenföring. Vattnet i vattendraget späds därmed ut varvid koncentrationen $CaCO_3$ sänks. Av minst lika stor betydelse torde emellertid vattnets ökade hastighet med ökad vattenföring vara eftersom vattnet därvid får förhållandevis mindre tid på sig att lösa berggrunden. Av stor betydelse är också det förhållandet att varje liter vatten som vid en lägre vattenföring cirkulerar i sprickor och slutna dräneringsgångar har en större ytkontakt med sin omgivning än vid en högre vattenföring varför mer $CaCO_3$ kan lösas. Douglas har emellertid också, vid en undersökning av Themsen, erhållit en positiv korrelation mellan totalhårdhet och vattenföring vilken utan ytterligare analyser är svårförklarbar. En bidragande orsak till förhållandet kan enligt Douglas vara att häftig och långvarig nederbörd pressat fram grundvatten som varit i kontakt med kalkstensberggrunden under mycket lång tid och därvid hunnit lösa betydande mängder $CaCO_3$.

För att erhålla en jämförelse mellan totalhårdheten i Artfjällets vattendrag och hårdheten i vattendrag från karstområden i andra klimatområden presenteras nedan några värden på kalciumhårdhet från olika områden sammanställda av Sweeting (1964) (tab. 11). Totalhårdheten i Artfjällets vattendrag varierar ungefär mellan 15 och 57 mg $CaCO_3$/l.

Några exempel på varierande totalhårdhet kan nämnas för att belysa att något enkelt samband mellan hårdhet och klimatområde inte existerar. Smith (1969) nämner värden på 46 mg $CaCO_3$/l för ett kalkstensområde i norra Canada, Corbel (1959) anger 200 mg $CaCO_3$/l för Spetsbergen medan Smith (1965) nämner värden på 400-500 mg $CaCO_3$/l för vatten i ett kalkstensområde i norra England. Variationerna torde i första hand vara beroende av dräneringssystemens storlek och vattnets flödeshastighet varefter faktorer som nederbörd, temperatur, berggrundens fysikaliska och kemiska egenskaper, typ av vegetation och jordtäcke etc. kan nämnas. De låga och i hög grad

avvikande hårdhetsvärdena på Artfjället, i jämförelse med ovan nämnda, är direkt jämförbara med de som presenterats för Lullihatjårroområdet i Lappland (Hellgren 1969). De låga värdena kan framförallt förklaras av att den för vattnet viktigaste CO_2 källan, nämligen en riklig vegetation och ett djupt humustäcke, i stort sett saknas för karstområden belägna i ET klimat samt av det förhållandet att det korrosiva vattnet passerar respektive karstområde på relativt kort tid varvid bara små mängder kalksten hinner lösas.

Tabell 11. Några jämförande värden på kalciumhårdhet uttryckt i mg $CaCO_3$/l (efter Sweeting 1964).

	Kalciumhårdhet
Kambriska kalkstenar, Durness, N. Skottland	60-80 mg $CaCO_3$/l
Karbonisk kalksten, S. Wales	80-100
Karbonisk kalksten, V. Irland	120-134
Kalk i södra England	280-300
Cockpit County, Jamaica	214
Cyrenaica, Nord Afrika	139-200
Jugoslavien, Dinariska kusten	140-150
NV Australien	200

V 7. KORROSIONSINTENSITET

V 7.1. Metodik

Den kemiska denudationen, eller denudationsintensiteten, anses normalt utgöra ett mått på korrosionens intensitet och därmed indirekt på ett karstlandskaps förkarstningsintensitet. För beräkning av den kemiska denudationen har Corbels (1959) formel, något modifierad av Williams (1963), använts.

$$X = E(T_c + T_m)n \cdot (10\ D)^{-1} \qquad (1)$$

X = denudationen i m^3/år och km^2 eller mm/1000 år

E = effektiva avrinningen i dm

T_c = genomsnittliga kalciumhårdheten uttryckt i mg $CaCO_3$/l

T_m = genomsnittliga magnesiumhårdheten uttryckt i mg $CaCO_3$/l i stället för mg $MgCO_3$/l

D = kalkstenens täthet i g/cm^3

1/n = den bråkdel av dräneringsområdet som utgörs av kalksten

Denudationen har också beräknats på basis av utförda vattenförings-mätningar och med hänsyn tagen till det omvända förhållandet mellan karbonathårdhet och vattenföring i enlighet med formeln:

$$X = Tr_{c+m} \cdot t \cdot (D \cdot A \cdot 10^6)^{-1} \qquad (2)$$

X = denudationen uttryckt i m^3/tidsenhet och km^2 eller mm/tidsenhet

Tr_{c+m} = totala transporten av Ca^{+2} + Mg^{+2} från kalkstensområdet A uttryckt i g $CaCO_3$/s (beräknad på karbonathårdheten)

t = tiden i sekunder

D = kalkstenens täthet i g/cm^3

A = kalkstensområdets yta i km^2

Som påpekats av Beckinsale (1972) så ger Corbels formel (1) inte ett mått på den sanna denudationen eller denudationshastigheten i ett karstlandskap. Detta gäller också för formel (2).

Avsevärda kvantiteter kalksten kan ha gått i lösning i det underjordiska dräneringssystemet vilket inte nödvändigtvis behöver ge upphov till en reell sänkning av landytan. Han föreslår därför att den intensitet med vilken kalksten i ett karstlandskap går i lösning borde uttryckas i m^3/år/m^3 kalksten. Då det emellertid kan föreligga stora svårigheter att bestämma volymen av en karstzon och då denudatiossorten mm/1000 år är allmänt vedertagen och använd vid undersökningar av den här typen har den kommit till användning också i detta arbete.

Denudationsvärdet x mm/1000 år får inte tydas som ett mått på den absoluta denudationen, dvs. att landytan sänkts x mm under de senaste 1000 åren, utan skall tolkas som ett mått på den recenta korrosionsintensiteten och därmed som ett indirekt mått på den recenta förkarstningsintensiteten

V 7.2. Resultat

Förhållandet mellan mängden, från kalkstensområdet A 1,09km^2 (fig. 20) borttransporterad $CaCO_3$, uttryckt i g/s, och vattenföringen vid U_1 framgår av figur 35. Kurvan 1 B representerar skillnaden i transport mellan U_1 och S_1 inom temperaturintervallet 0-4° C och kurvan 2 B skillnaden i intervallet 5-13° C. 1 A och 2 A visar förhållandet mellan koncentrationer och vattenföring och är beräknade på

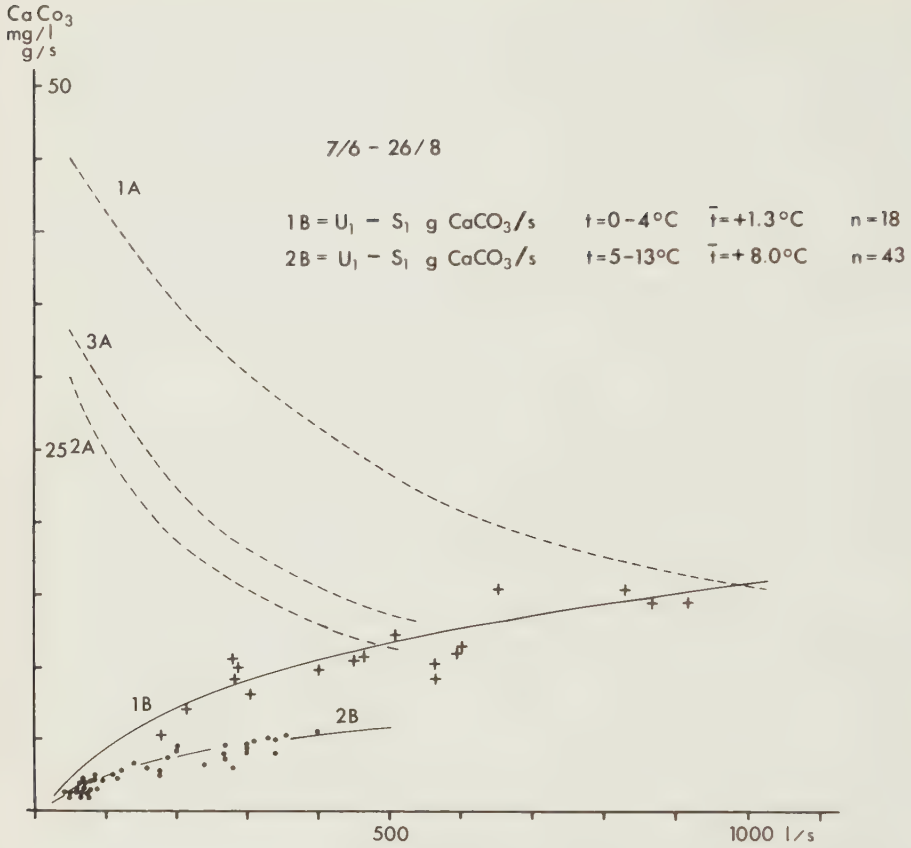


Fig. 35. Förhållandet mellan mängden borttransporterad $CaCO_3$, från kalkstensområde A, och vattenföringen vid karstkällan U_1. Kurvan 1 B representerar skillnaden i transport mellan U_1 och sluket S_1 inom vattentemperaturintervallet 0-4° C och kurvan 2 B skillnaden i intervallet 5-13° C. 1 A och 2 A visar förhållandet mellan karbonathårdhet och vattenföring och är beräknade på basis av 1 B respektive 2 B. Kurvan 3 A är konstruerad genom interpolation för vattentemperaturen +6° C.

The relationship between $CaCO_3$ transportation from limestone area A and the water discharge at karst spring U_1. 1 B and 2 B represent the difference in transportation between outlet U_1 and swallet S_1 for the temperature intervals t and the mean temperatures $\bar{t}$. n denotes for the number of observations. 1 A and 2 A are calculated on the basis of 1 B and 2 B respectively and show the relationship between carbonate hardness and water discharge. 3 A is based on interpolation for the water temperature +6° C.

1 B respektive 2 B. De kalkmängder som transporteras till kalkstensområdet via de bäckar som slukas vid S_2 och S_3 är så små att de saknar betydelse varför de heller inte medtagits vid beräkningen av transporten från område A. Av figuren framgår att transporten är större för lägre vattentemperatur än för högre för samma vattenföring.

Den största transportintensiteten inträffar under snösmältningsperioden i slutet av maj och början på juni samtidigt som halten infiltrationsvatten i det subterrana dräneringssystemet antager maximala värden (fig. 36).

Om den konventionella metoden, med hjälp av Corbels formel, används för att beräkna den intensitet med vilken kalkstenen går i lösning och det genomsnittliga hårdhetsvärdet under mätningsperioden användes erhålles resultatet:

(1) $X = 8{,}54 \cdot 19 \cdot 3{,}68 \cdot (10 \cdot 2{,}6 \cdot 1{,}09)^{-1}$;
$X = 21{,}1$ mm/1000 år

Om denudationen å andra sidan beräknas på grundval av den $CaCO_3$ koncentration som, i enlighet med förhållandet mellan karbonathårdhet och vattenföring, vid U_1 motsvarar årsmedelvattenföringen 105 l/s och medeltemperaturen +6,0° C erhålles följande resultat:

(1) $X = 8{,}54 \cdot 29{,}5 \cdot 3{,}68 \cdot (10 \cdot 2{,}6 \cdot 1{,}09)^{-1}$;
$X = 32{,}7$ mm/1000 år

Båda dessa beräkningar är emellertid missvisande eftersom det inte i någon av dem tagits hänsyn till förändringen i hårdhet med avseende på vattenföring och vattentemperatur.

Därför har $CaCO_3$ transporten från området beräknats med hjälp av formel (2) för nedanstående perioder, genomsnittliga vattenföringar och medeltemperaturer (tab. 12). Totala transporten Tr_{c+m}, uttryckt i g/s, bestämdes för varje fall med hjälp av figur 35 där kurvor för medeltemperaturerna i tabell 12 måste interpoleras fram. Transporten anges för varje period i m^3 $CaCO_3$.

Samtliga transport och denudationsvärden höjs 10% om de beräknas på totalhårdheten. Det bör noteras att inte mindre än 67% av årstransporten löst $CaCO_3$ äger rum under bara tre månader av året, nämligen under perioden maj-juli. Under samma period är halten infiltrationsvatten vid U_1 uppe i 60% av det totala utflödet varför

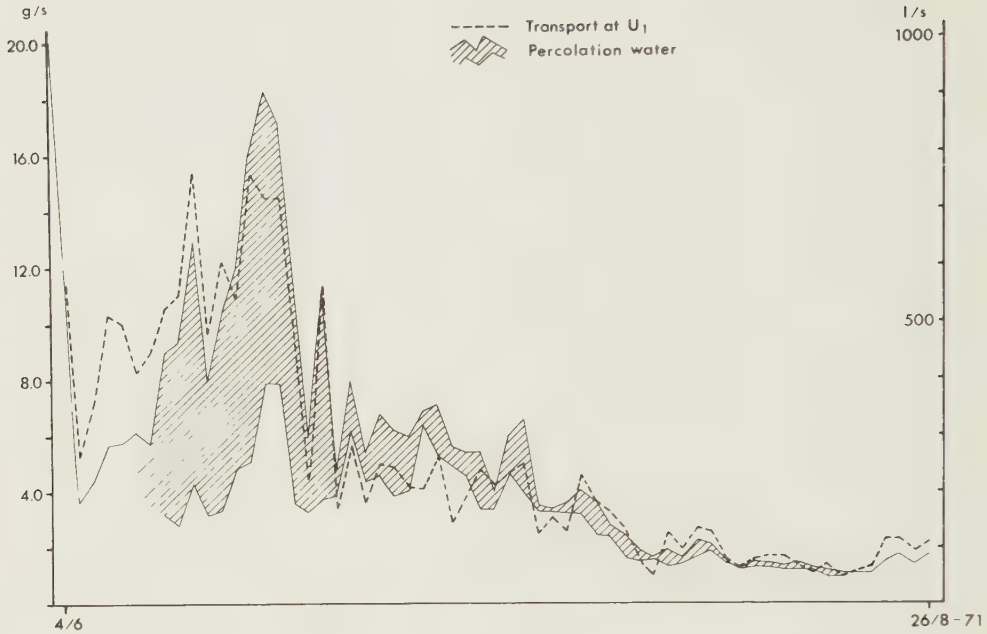


Fig. 36. Förändringarna i vattenföring och $CaCO_3$ transport vid utloppet U_1. Transportvärdena är beräknade på transportskillnaderna mellan utloppet U_1 och sluket S_1. Den största transporten äger rum under snösmältningen i slutet av maj och början av juni när halten infiltrationsvatten är som störst (upp till 60% av vattenflödet vid U_1). Inte mindre än 67% av den årliga $CaCO_3$ transporten äger rum under perioden maj-juli.

The changes in water discharge and $CaCO_3$ transportation at outlet U_1. The transport values account for the difference in transportation between U_1 and swallet S_1. The largest transportation takes place during the snow melt at the end of May and the beginning of June when the amount of percolation is largest (up to 60% of the outflow at U_1). No less than 67% of the annual $CaCO_3$ transportation occurs in the period May-July.

man kan konstatera att en betydande del av berggrunden lösts av vertikalt cirkulerande vatten (infiltrationsvatten).

Tabell 12. $CaCO_3$ transport från kalkstensområdet A (1,09 km^2).

Period	Q vid U_1	V.temp.	Trp.	% av årstrp.
Maj	225 l/s	+0,9° C	7,2 m^3	23,7%
Juni	425	+3,0	10,0	32,9
Juli	155	+8,8	3,2	10,5
Augusti	75	+8,3	2,0	6,6
Sept.-april	25	+2,0	8,0	26,3
			Totalt 30,4 m^3	100,0%

Q = vattenföring
V.temp= vattentemperatur
Trp = transport

30,4 m^3/år = 27,9 mm/1000 år

En god uppfattning om de kemiska processernas verkan och fördelning i ett kalkstensmassiv ges av Williams (1969) (fig. 37)

V 7.3. Korrosionsintensitetens variationer i skilda klimatområden. Diskussion och jämförelser

Det finns mycket få analyser av korrosionsintensiteten i karstlandskap i arktisk och subarktisk miljö presenterade i den internationella litteraturen. Corbel (1957, 1959, 1960) har i sina arbeten försökt påvisa att den kemiska denudationen framför allt är beroende av temperaturen, varför den i arktiska områden anses vara mycket hög p.g.a. det faktum att vatten vid 0° C kan lösa ca 1,6 ggr så mycket CO_2 som vid +20° C för samma lufttryck. Williams (1949) har i ett av sina tidigare arbeten presenterat resultat som tyder på att CO_2 koncentrationen i luften under ett snöfält kan vara upp till två gånger så högt som i den omgivande atmosfären vid normalt lufttryck. Bögli (1956, 1960) har funnit att CO_2 halten i cirkulerande smältvatten från snö kan variera mellan 1,32-3,63 mg/l vilket skall jämföras med det faktum att vatten vid 0° C och ett partialtryck på 0,03% bara kan lösa 1,01 mg/l. Att smältvatten har en högre förmåga att lösa $CaCO_3$ än regnvatten har också påvisats genom försök utförda av Bauer (1964). Smith (1969) anser emellertid, efter korrosionsstudier i norra Canada, att snön betraktad som CO_2 källa är av mycket liten betydelse för vattnets korrosiva aktivi-

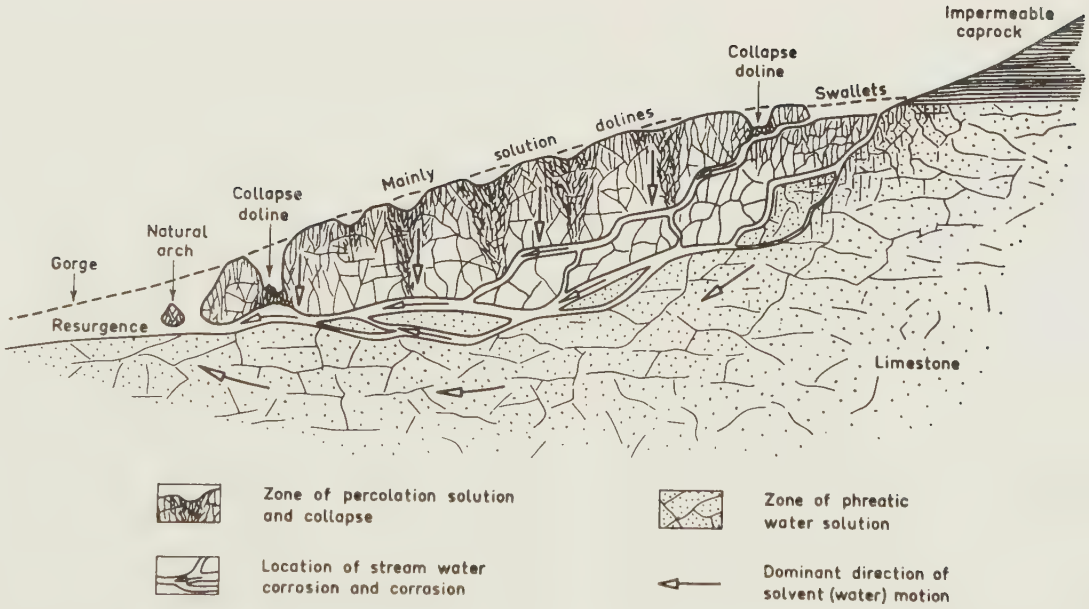


Fig. 37. Distributionen av den kemiska lösningen i ett kalkstensmassiv.

The distribution of solution through a limestone mass (efter Williams 1971).

tet. Betydligt viktigare CO_2 producenter är humus och vegetationstäcken i vilka CO_2 koncentrationer som är 10-100 ggr större än i atmosfären kan finnas (Birot 1954). Erosionen i vertikalled i karstområdet Moravský Kras, Tjeckoslovakien, anses vara ca 10 ggr högre än erosionen i den horisontella cirkulationszonen, beroende på att infiltrationsvattnet anrikats på kolsyra då det passerat genom det humus och jordtäcke som täcker kalkstenen och fyller delar av dess sprickor (Raušer et al. 1965). Denna CO_2 källa saknas till stora delar i arktiska områden.

För ett kallt, aridt arktiskt klimat har Corbel (1959) presenterat ett genomsnittligt denudationsvärde på 40 mm/1000 år medan han anser att denudationen i ett arktiskt humidt klimatområde överstiger 400 mm/1000 år. Några jämförande värden på den kemiska denudationen för kalkstensområden belägna i arktiska klimatområden ges i tabell 13.

Tabell 13. Jämförande värden på recent denudationshastighet och årsnederbörd för kalkstensområden i arktisk miljö.

	Denudation	Årsmedelnederbörd
Västspetsbergen (Corbel 1960)	16 mm/1000år	350 mm
Västspetsbergen (Helldén 1973 a)	11	389
Inre Lappland, Sverige (Corbel 1960)	40	-
Artfjället, Lappland	28	1000
Somerset Island (Smith 1969)	2	129

För att erhålla en bild av i vilken mån de i tabell 13 presenterade värdena skiljer sig från denudationsberäkningarna från karstlandskap belägna i andra klimatområden återges nedan en sammanställning över denudationshastigheter, klimattyper enligt Köppens (1936) klassificering och årsmedelnederbörd för skilda karstområden (tab. 14). Presentationen bygger delvis på en sammanställning gjord av Jennings (1971).

Att utifrån presenterade värden draga någon slutsats angående skillnaden i denudationshastighet mellan olika klimatområden låter sig inte göras då variationerna, även inom ett område, är för stora.

En starkt bidragande orsak till den stora spridningen av denudationsvärdena är att man inte vid någon av de ovan nämnda undersök-

Tabell 14. Denudationshatigheten för några karstlandskap inom olika klimatområden.
A = karstområde, K = klimattyp enligt Köppens (1936) system, Nb = årsmedelnederbörd, X = denudationshastighet.

A	K	Nb	X
Tanana River, Alaska (Corbel 1959)	Dfc	450 mm	40 mm/1000 år
Svartisen, Norge (Corbel 1957)	Dfc	740-4000	275-5000
Moravský Kras, Tjeckoslovakien (Štelcl et al. 1969)	Dfb	620	25
Moravský Kras, Tjeckoslovakien (Corbel et al. 1965)	Dfb	620	9
Craven, England (Sweeting 1965)	Cfb	1250-1500	40
Mellte River, Wales (Groom et al. 1965)	Cfb	1600	16
Mendip, England (Corbel 1957)	Cfb	900-1100	40
Slovenia, Jugoslavien (Gams 1969 b)	Cfb	1250-2000	30-80
Bulgarien (Markowicz et al. 1972)	-	440-1523	23-47
Södra Algeriet (Corbel 1957)	Bwh	60	6
Grand Canyon, USA (Corbel 1957)	Bwh	25-50	7
Kissimi River, Florida, USA (Corbel 1959)	Cfa	1200	5
Yucatan, Mexiko (Corbel 1959)	Aw	1000-1500	12-44

ningarna tagit hänsyn till det förhållandet att totalhårdheten kan variera med vattenföringen. Beräkningarna har i stället skett på grundval av erhållna medelvärden för totalhårdheten i en del fall under mycket korta mätperioder. De erhållna hårdhetsvärdena har sedan satts in i Corbels formel.

Analyser som utförts under lågvattenförhållanden kan därför resultera i för höga värden på denudationen medan analyser som utförts under högvatten kan resultera i allt för låga värden.

V 8. SOTSBÄCKSGROTTAN

V 8.1. Historik

Inom karstområdet finns ett 30-tal grottor vilka varierar starkt i storlek. De minsta är så små att en fullvuxen man bara med möda kan rymmas i dem, medan de största vanligen är framkomliga 20-30 meter. Samtliga, med undantag av två, är utbildade i samband med sprick-

doliner eller, vilket är vanligast, instörtningsdoliner. De två undantagen utgörs av de tunnlar vilka leder in i kalkstensmassivet från de på kartan (fig. 20) markerade fossila utloppen (fig. 40).

Ett markant undantag från de nämnda smågrottorna utgör Sotsbäcksgrottan vilken genom sin storlek och formrikedom utgör ett särdrag i svensk natur. Grottan, som utgör en integrerad del av karstområdets subterrana dräneringssystem, upptäcktes 1966 av medlemmarna i Svenska Speleologförbundet (SSF), Yngve Freij och Ebbe Johansson, och har alltsedan dess varit utsatt för intensiv utforskning i SSF´s regi. En preliminär karta färdigställdes 1969 av Freij och Johansson (Sjöberg 1970) och den sammanlagda längden av gångarna i grottan har av SSF uppmätts till 1650 m, vilket gör den till Sveriges största kända grotta före Lummelundagrottan (1350 m) på Gotland och Lullihatjårrogrottan (1110 m) norr om Torne Träsk (Freij et al. 1971). Då nya gångsystem upptäckts efter 1969 kartlades hela grottsystemet om sommaren 1972 av författaren. Samtidigt avvägdes alla gångsystem samt markytan ovanför grottan (fig. 38-39).

Nedan ges en sammanfattande beskrivning över grottans utbredning, morfologi och klimat samt en diskussion kring dess genes och ålder. En mer detaljerad analys av grottans klimatförhållanden samt utbredningsmönstrets relation till berggrundens tektonik, strykning och stupning tas ej upp i detta sammanhang.

V 8.2. Mätmetodik

Plankartan har upprättats efter mätningar med måttband och kompass varvid kartan konstruerats fortlöpande på ritplast i grottan. För att kontrollera att måttbandet hölls horisontellt vid mätningarna användes vattenpass. Sträckan mellan ingången (S_1) och grottans innersta del under "Djävulskratern" (520 m) uppmättes två gånger varvid en skillnad på 2,5 meter erhölls.

Avvägningen i grottan skedde med hjälp av meridianspegel och latta. Efter att ha avvägt huvudgången mellan S_1 och grottans innersta del två gånger erhölls en skillnad på 2,0 meter för en vertikalskillnad på 110 meter. De erhållna värdena visar god överensstämmelse med de som presenterats i Freij och Johanssons karta. Klimatdata insamlades under sommaren 1970 och 1971 samt under en vecka i december 1970 och avser i första hand temperatur och luftfuktighet vilka re-

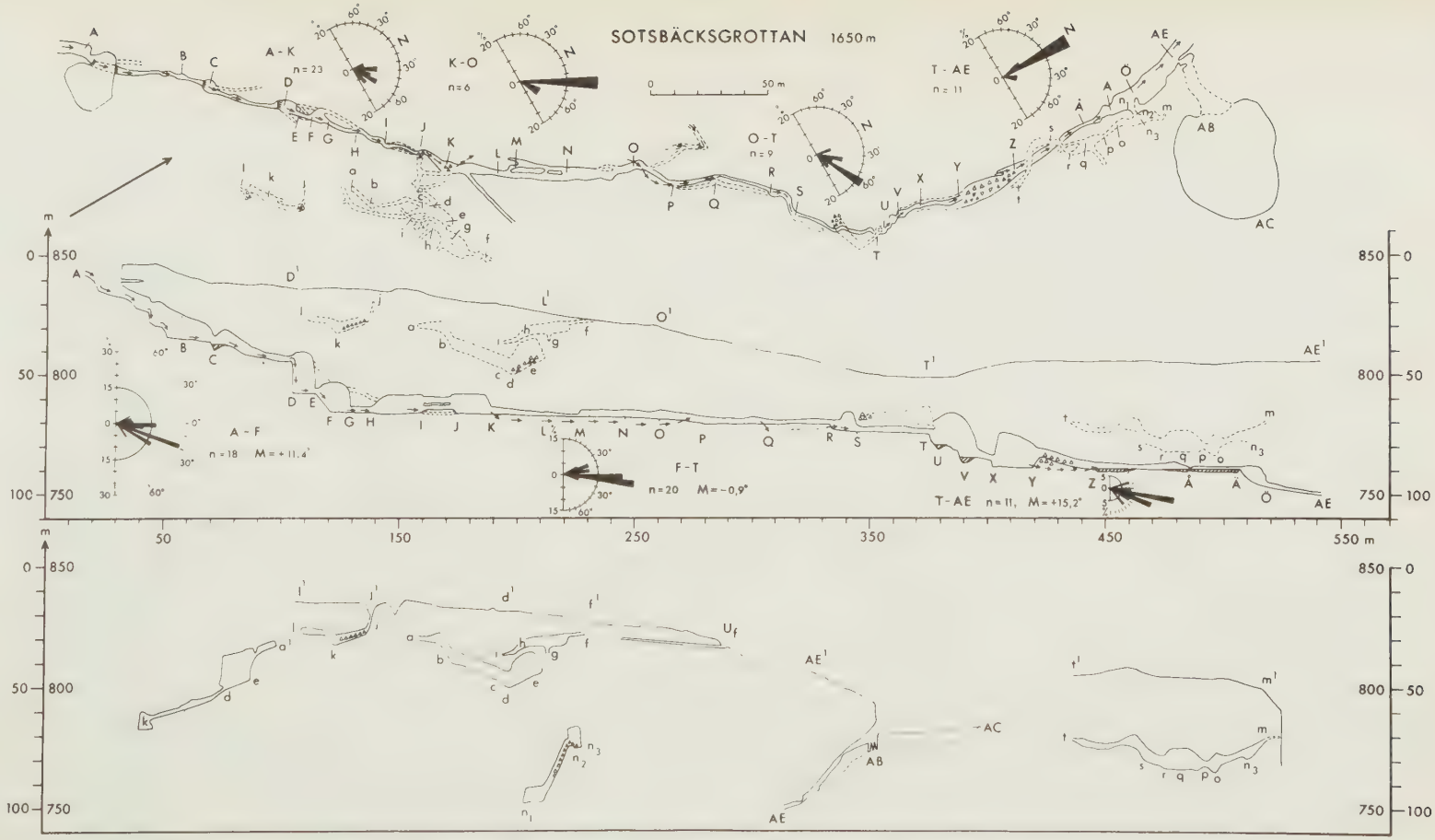


Fig. 38. Sotsbäcksgrottan. Streckade linjer anger gångar i annat plan än huvudgången A-AE. De övre rosdiagrammen anger berggrundens strykning för sträckorna A-K, K-O, O-T respektive T-AE. De nedre rosdiagrammen anger berggrundens stupning i veckaxelns strykningsriktning för sträckorna A-F, F-T och T-AE. n anger antalet utförda mätningar och M respektive medelvärde för stupningen. Pilarna markerar vattenflöden och trianglarna rasackumulationer.

Sotsbäcks Cave. Dotted lines indicate passages in a different niveau than the master passage A-AE. The rose diagrams above indicate the strike of the bedrock for the distances A-K, K-O, O-T and T-AE. The rose diagrams below indicate the dip of the bedrock in the direction of the fold axes for the distances A-F, F-T and T-AE. n denotes for the number of measurements and M the mean values of the dip. The arrows indicate water streams and the triangles collapse accumulations.

Fig. 39. Sotsbäcksgrottans utbredning mellan inloppet A och "Djävulskratern" vid AC. U_f = fossilt utlopp 1) större karstdepression.

The extension of the Sotsbäcks Cave system between inlet A and the "Devil´s Crater" at AC. U_f = fossil karst spring 1) karst depressionsof great dimension.

Fig. 40. Fossilt utlopp 815 m.ö.h.

Fossil karst spring 815 m.a.s.l.

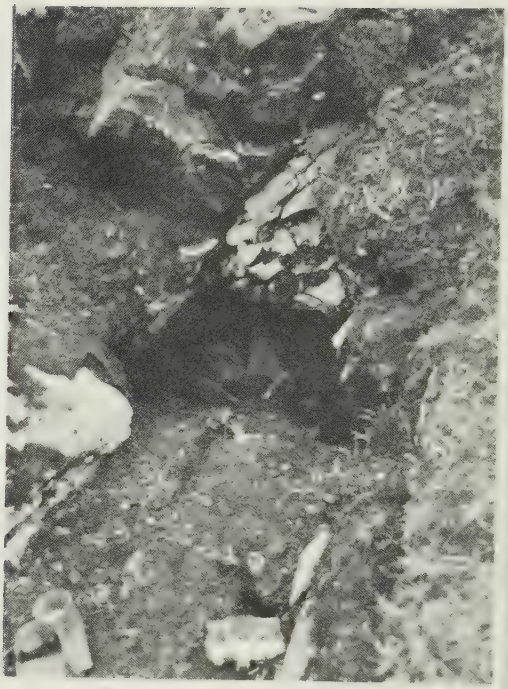


Fig. 41. Vy över Artfjällets karstområde. Sotsbäcksgrottans ingång markeras av A. I bakgrunden sjön Över-Uman.

View over the karst area. The entrance to the SotsbäcksCave (S_1) is indicated by A. In the background the lake Över-Uman.

gistrerats med 7 termohygrografer utplacerade i olika delar av grottsystemet. Avvägningen skedde med utgångspunkt från en barometerbestämd punkt vid grottans ingång. S-ytornas orientering har mätts med kompass med klinometernål ungefär var tionde meter.

V 8.3. Utbredningsmönster

Sotsbäcksgrottan kan sägas bestå av två komplex nämligen den stora huvudgången A-AE, vilken dräneras av den bäck som slukas vid S_1 och har sitt utlopp vid U_1, och ovanför huvudgången liggande gångkomplex på kartan utritade med streckade linjer (fig. 38). De senare gångkomplexen benämnes "fossila" och skiljer sig från huvudgången genom avvikande morfologi, temperatur och luftfuktighet samt genom avsaknaden av koncentrarade vattenflöden (fig. 41-46).

Huvudgången A-AE har sin början vid instörtningssluket S_1, vilket är mer eller mindre snötäckt ända fram till början av augusti, och följer sedan i stort sett kalkstenens strykning i en båge fram till instörtningsdolinen "Djävulskratern" med vilken den står i förbindelse. På den ca 90 m långa sträckan mellan ingången och det 12,5 m höga vattenfallet vid D löper huvudgången längs en av erosion vidgad spricka vilken skär kalkstenslagrens stupning i det närmaste vinkelrät och löper parallellt med dess strykning. Gången är 1-2 m bred och mellan 2,5 och 7,5 m hög (fig. 47). Den vidgar sig vid vattenfallen D-F i två större salar för att därefter fortsätta i det närmaste horisontellt. På den drygt 115 m långa sträckan mellan ingången och F sänker sig huvudgången via forsar och vattenfall ca 60 m av den totala sänkningen 110 m. På samma sträcka varierar S-ytornas stupning i veckaxelns strykningsriktning mellan 0° och 50° med ett medelvärde på 11° för att vid F plana ut och bli i det närmaste horisontell.

Den ca 230 m långa sträckan F-T kännetecknas av att gången löper i det närmaste horisontellt och är utbildad huvudsakligen längs kalkstenens skiktfogar. Lagren är svagt och oregelbundet veckade men uppvisar ändå en i gångens och veckaxelns riktning svagt stupande trend men, i motsats till bottenprofilens lutning, denna gång i riktning mot ingången A. Det har därför visat sig omöjligt att finna någon referensyta i kalkstenens skiktning som är följbar mer än ett hundratal meter. Gångens tvärsnitt varierar i genomskärning

Fig. 42. Utloppet U_1 fotograterat i början av maj.

Karst spring U_1 in the beginning of May.

Fig. 43. Sluket S_1 fotograferat i mitten av juli.

Swallet S_1 in the middle of July.

Fig. 44. Ingången till Sotsbäcksgrottan (sluket S_1) fotograferat i början av augusti.

The entrance (swallet S_1) to the Sotsbäcks Cave in the beginning of August.

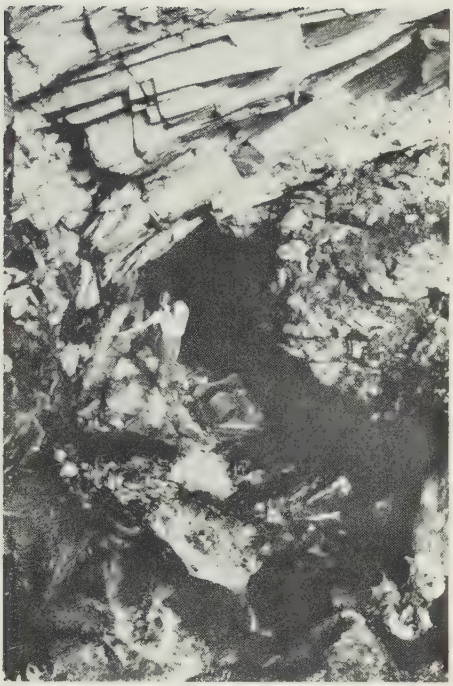


Fig. 45. Sluket S_1 sett från grottans ingång i början av augusti.

The swallet S_1 seen from the entrance of the cave in the beginning of August.

Fig. 46. Sluket S_1 sett från grottans ingång i början av juni.

Swallet S_1 seen from the entrance of the Cave in the beginning of June.

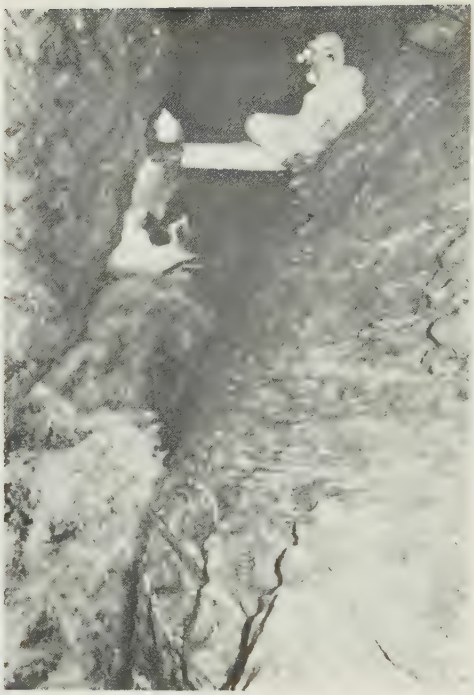


Fig. 47. I bakgrunden grottans ingång.

In the background the entrance of the cave.

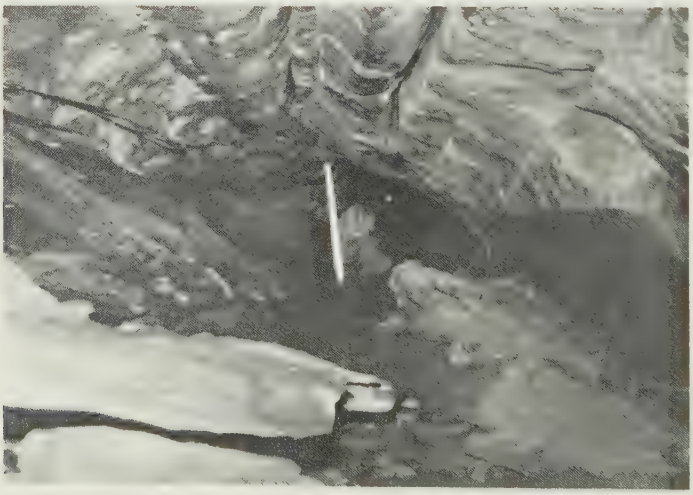


Fig. 48. Freatisk gång med flytfasetter. Gången är utdragen i skiktfogens riktning.
Phreatic passage with scallops. The passage has been modified by erosion along the beddingplane.

men antager, i de fall den inte influerats av sprickor eller ras, ofta formen av en cirkel eller ellips. Vanligen modifieras formen av sprickor och blir därmed utdragen i dessas riktning (fig. 48). På vissa ställen har den nuvarande subterrana bäcken uteroderat en 0,5-2,0 m djup ränna i botten på den cirkelformade gången (fig. 49-50).

Mellan T och X antager S-ytornas stupning i veckaxelns riktning åter högre värden och gången sänks via tre forsar ca 13 m på en sträcka av 25 m. Vid U och V finns två stycken, knappt två meter djupa, dammar utbildade med en diameter på ca 5 m. De två salar i vilka dammarna är belägna antager formen av jättegrytor. De sista 25 metrarna före den första dammen går gången i ett sick-sackmönster som i viss mån påminner om ett meandrande system.

Mellan X och Ä har gången återtagit sitt nästan horisontella lopp men avbryts mellan Y-Z av en stor anhopning med rasmaterial. Vid Ä, 45 m under markytan och ca 85m lägre än punkten A, blottas för första gången den underliggande berggrunden vilken består av fyllitisk grönskiffer. Det är på denna yta som vattnet rinner när det slutligen försvinner i rasmaterial från instörtningsdolinen"Djävulskratern" ca 10 m bortanför AE. Gången breddas kraftigt vid Ä samtidigt som takhöjden efterhand sjunker för att slutligen bli så låg att det är omöjligt att följa huvudgången längre. Strax nedanför AE är dess bredd 7 m och dess höjd knappt en meter. Vid AE står grottan i förbindelse med den 35 m djupa Djävulskratern vilken till större delen av året är täckt med snö.

De fossila systemen skiljer sig, som tidigare nämnts, från huvudgången huvudsakligen genom avsaknaden av rinnande vatten. De består av den så kallade Lergrottan, vilken är fristående men med största sannolikhet står i förbindelse med Sotsbäcksgrottan, det gångsystem som står i förbindelse med huvudgången vid J och K, salen ovanför T samt det system som står i förbindelse med huvudgången vid Ö. Därtill kommer mindre gångar vid ingången C, E, F, H, I, P, Q och S. Gemensamt för samtliga är att de en gång tjänstgjort som dräneringskanaler men senare övergivits. Gångarnas utseende varierar. I den mån de utbildats i samband med sprickor, vilket i hög grad är fallet för gångsystemet a-h, är gångarna smala och höga. Då de huvudsakligen utbildats längs skiktfogar är de ofta ellipsformade och utdragna i stupningsriktningen. De kan emel-

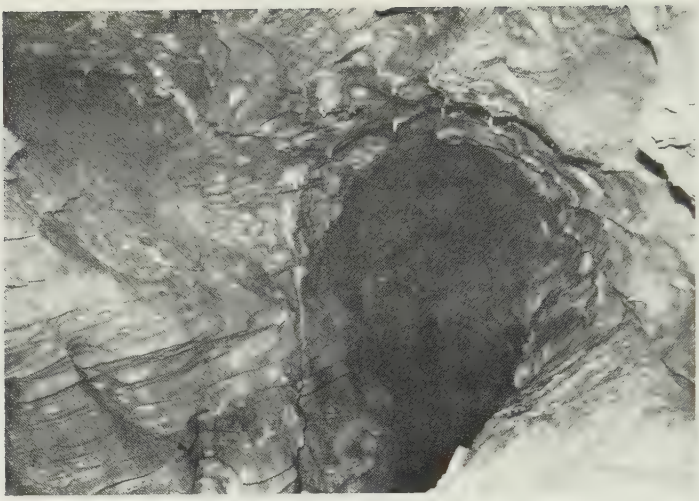


Fig. 49. Freatisk gång med av vadöst vatten nederoderad botten.

Phreatic passage with incised floor.

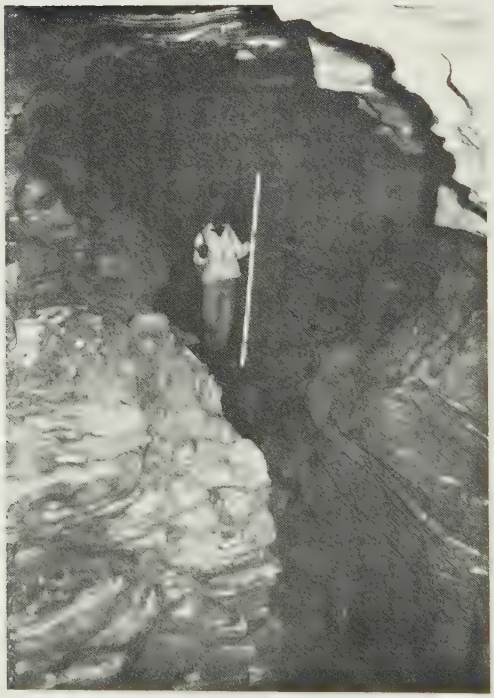


Fig. 50. Freatisk gång med av vadöst vatten nederoderad botten.

Phreatic passage with incised floor.

lertid modifieras av mindre ras och erhåller då en rektangulär form i tvärsnitt. Lergrottan samt den gång som förmodligen sammanbinder det fossila utloppet U_f med innanförliggande fossila gångsystem uppvisar huvudsakligen de två senare gångtyperna. Större ras ger upphov till välvda tak eftersom dessas verkan blir att så stor hållfasthet som möjligt uppnås. Flertalet av de större salarna i grottan har någon gång varit utsatta för ras varför deras tak vanligen antager en mer eller mindre välvd form. Som exempel kan nämnas det fossila systemet ovanför T. Gångsystemet vid Ö utgör ett mellanting och har således vid sin utformning påverkats av både sprickor, skiktfogar och ras. Stora delar av de fossila systemen karakteriseras också av att väggarna är vittrade och belagda med en 1-3 cm tjock vittringsrest.

V 8.4. Erosionsformer

Den relativa betydelsen av korrasion och korrosion vid utbildandet av grottor och de i grottorna befintliga erosionsformerna ha diskuterats alltsedan slutet på 1800-talet (Davis 1930, Malott 1937, Jennings 1971). Efter mätningar av sedimenttransport och korrosion i England har Newson (1971) kommit till resultatet att den mekaniska erosionen är av stor betydelse vid utbildandet av huvudgångarna i ett grottsystem.Detta gäller framför allt vid mycket höga vattenföringar då halten icke löst transporterat material i vattnet kan överstiga den kemiska transporten. Den rikliga förekomsten av cirkelformade gångar samt erosionsfenomen av samma storlek och form på väggar, golv och tak i de flesta grottor tolkas emellertid som ett tecken på att den kemiska erosionen vida överstiger den mekaniska. De erosionsformer som finns representerade i Sotsbäcksgrottan talar också för att så är fallet. Vissa fenomen antyder dock att korrasionens betydelse inte får negligeras. Trots att vattnet både vid inloppet S_1 och utloppet U_1 vid alla vattenföringar varit kristallklart är stora delar av den underjordiska bäckfåran täckt med sand, grus och väl rundade stenar och block. Det mesta av detta utgörs av rasmaterial vilket omarbetats av vattnet och består av kalksten, kvartsit och skiffer (fig. 51).

Av stor betydelse vid utformandet av subterrana dräneringssystems morfologi, både under freatiska och vadösa förhållanden, torde den i speleologisk litteratur mindre kända kavitationsprocessen vara.

Processen bygger på det förhållandet att då vattnets ångtryck understiges bildas gasblåsor vilka om vattnets tryck överstiger ångtrycket kondenseras. Kondensationen som sker i form av en implosion ger upphov till en stötvåg vilken har eroderande effekt. Tryckförändringarna kan orsakas av varierande vattenhastigheter. Höjd hastighet ger sänkt tryck medan sänkt vattenhastighet ger höjt tryck (Alonso et al. 1972). Enligt Hjulströms (1935) beräkningar kan det kritiska hastighetsvärde som vattnet måste uppnå för att dess ångtryck skall underskridas fastställas till ca 12 m/s för noll-gradigt vatten vid 760 mm lufttryck. Så höga vattenhastigheter är mycket ovanliga i naturen men kan emellertid överskridas i forsar och vattenfall. Vid ett fritt fall på 11,5 m uppnår vattnet enligt Hjulström en hastighet på 15 m/s. Subglacialt smältvatten under högt hydrostatiskt tryck kan också, enligt Hjulström, förväntas uppnå hastigheter överskridande den kritiska kavitationshastigheten. I ett underjordiskt dräneringssystem ges rika möjligheter till hastighets- och tryckförändringar i vattnet. Resultat av kaviationsprocessen kan därför förväntas uppträda i samband med vattenfall och forsar, då trånga gångar vidgar sig eller då trängre vattenförande system leder ut i gångar av större dimensioner, förutsatt att förändringarna i vattenhastigheten är tillräckligt stora. Processen kan därför utgöra ett komplement till den av Bögli (1964) introducerade blandningskorrosionen och torde kunna ge upphov till samma typ av gångmodifieringar och håligheter som beskrivits av densamme.

De erosiva formerna representeras, förutom av gångarna i sig själva, av vattenfall, forsar, jättegrytor, flytfasetter, flutes, korrosionskolkar och grottkarren.

V 8.4.1. Gångar

Cirkel- eller ellipsformade gångar har utbildats under hydrostatiskt tryck. De ger genom sin form minsta möjliga motstånd mot vattnet och har bildats genom att ursprungligt vattenledande "hålrum" vidgats konformt, huvudsakligen genom korrosion. Denna typ av gångar går också under benämningen freatiska gångar (Lehmann 1932, Thrailkill 1968, Ford 1971). Utbildandet av elliptiska gångar sker enligt Bögli (1965) till stor del genom att vatten av olika hårdhet, dels från huvudgången och dels från någon spricka eller skikt-

Fig. 51.

Fig. 52. Gång av freatisk och vadös karaktär
Passage with phreatic and vadose characteristics.

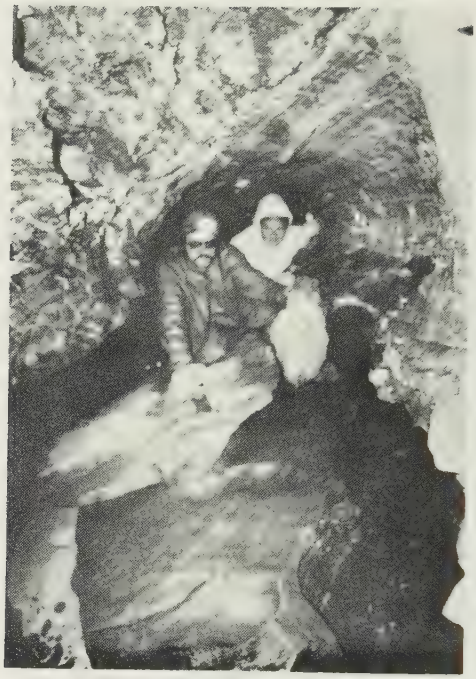


Fig. 53. Gång av freatisk och vadös karaktär.

Passage with phreatic and vadose characteristics.

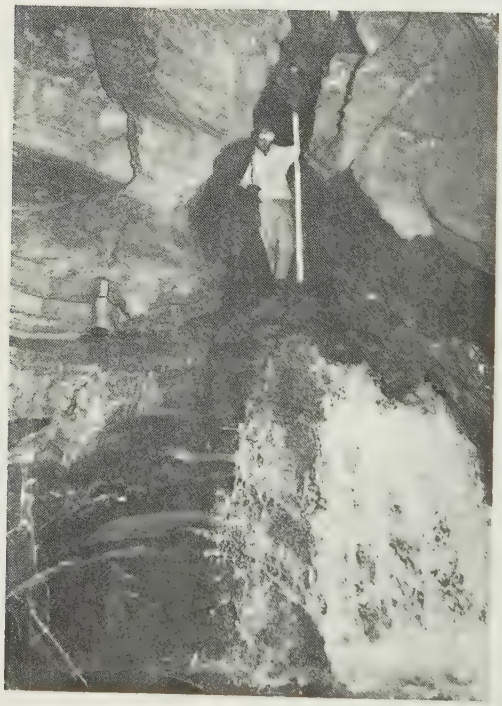


Fig. 54. En mindre fors vid V.

A small rapid at V.

fog som skär huvudgången, blandas varvid blandningskorrosionen (Mischungskorrosion) uppstår. En spricka eller skiktfog som skär en cirkelformad gång ger upphov till svaghetszoner i gången varför det är naturligt att cirkeln genom selektiv erosion omvandlas till en ellips utdragen i sprickans eller skiktfogens riktning (fig. 48). Exempel på cirkelformade och framförallt elliptiska gångar finns mellan O och S samt i det fossila system som ansluter sig till huvudgången vid Ö.

I det ögonblick som vattennivån i ett gångsystem sänks och luft kan cirkulera ovanför vattenytan börjar de freatiska gångarna att omvandlas. Fritt rinnande vatten (vadöst vatten) fördjupar genom både korrosion och korration de cirkelformade gångarna. Dessa blir efterhand, beroende på hur snabbt vattenståndet ändras, mer eller mindre triangulära, med spetsen på triangeln uppåt. Under vissa omständigheter kan en gång behålla sin cirkulära eller elliptiska form i sin övre del medan den nedre modifierats genom erosion längs sprickor och/eller skiktfogar (fig 52-53).

V 8.4.2. Vattenfall och forsar

Vattenfall och forsar finns utbildade vid A-F, T-X och Ä-Ö i samband med att berggrundens S-ytor stupar mer än normalt i veckaxelns riktning. Erosionen är både mekanisk och kemisk (fig. 54).

V 8.4.3. Jättegrytor

Jättegrytor har utbildats i samband med vattenfall och forsar. Bland de största märks dammarna U och V. I de inre delarna av den fossila gången vid C återfinns en grupp jättegrytor, med en diameter på 0,4-0,8 m och ett djup på ca 1 m, i vilkas botten grus, sten och block av grönskiffer och kvartsit återfinnes. Den mekaniska erosionen kan därför förmodas ha varit av en viss betydelse vid deras genes. I hur hög grad löpare medverkat till grytornas utformning är emellertid mycket svårt att bedöma med tanke på att det finns bildningar av nästan motsvarande storlek och form både på väggar och tak i vissa delar av grottan (jfr korrosionskolkar) (fig. 55).

V 8.4.4. Flytfasetter

Skålformade urholkningen,vanligen 2-10 cm långa, vilka kan förekom-

Fig. 55. Jättegrytor.
Pot-holes.

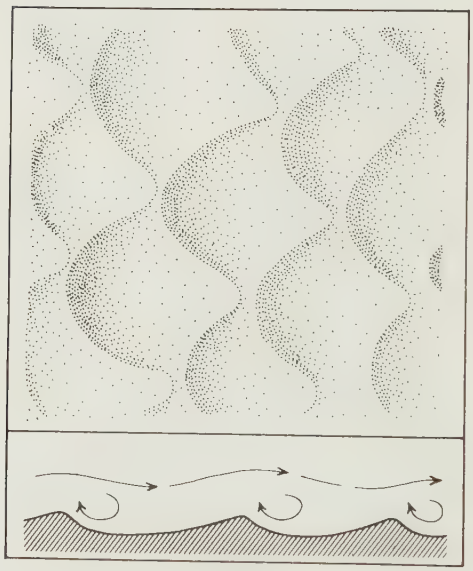


Fig. 56. Flytfasetter utbildade genom virvelbildning i samband med oregelbundenheter i berggrunden.

Current markings or scallops developed from small irregularities by eddy currents (efter Jennings 1971).

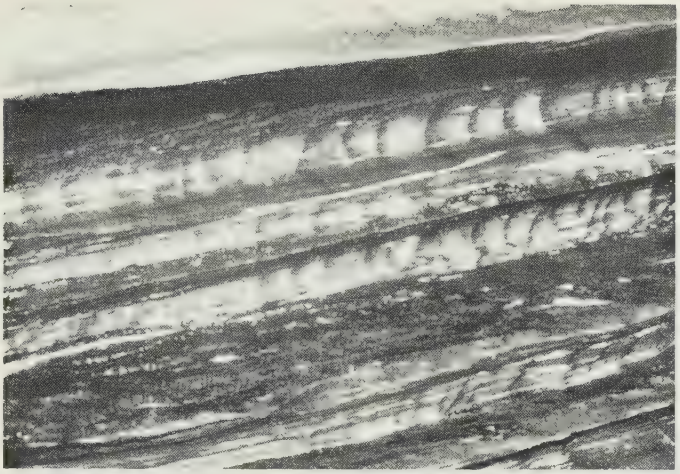


Fig. 57. Flytfasetter i kalksten mellanlagrad av tunna skifferskikt.

Scallops in limestone with intervening schists.

Fig. 58. Flytfasetter i kalksten mellanlagrad av utskjutande skifferskikt. Ett exempel på selektiv korrosion.

Scallops in limestone with intervening schists. An example of selective corrosion.

ma på kalksten som varit i kontakt med rinnande vatten kallas flytfasetter (scallops, Fliessfacetten). De 2-3 cm höga ryggar som åtskiljer konkaviteterna påminner i hög grad om ripples med en mot strömmen vättande långsamt sluttande sida och en med strömmen vättande brant sida (fig. 56). Flytfasetterna kan förekomma i stora system på väggar, golv och tak både i freatiska ooh vadösa gångar och ger som antytts en indikation på hur vattnet som bildat dem flutit (fig. 57). Avståndet mellan två ryggar kan enligt Goodchild et al. (1971) uppgå till 2 m i Mammoth Cave i USA. Mycket har skrivits om flytfasetternas genes och varierande storlek. Man har bl.a. hävdat abrasionens stora betydelse samt att det torde föreligga ett samband mellan fasetternas storlek och ålder (Maxson 1940, Davis 1963, Glennie 1963). Efter laboratorieförsök har man emellertid kunnat konstatera att avståndet mellan fasetternas ryggar står i ett omvänt förhållande till vattenhastigheten (Curl 1964, 1973, Goodchild et al. 1971). Man har också kunnat påvisa att de kan formas utan någon inverkan av abrasion. Det förhållandet att man i Sotsbäcksgrottan kan finna fasetter även i taket på vissa gångar vilka till form eller storlek inte avviker från de på väggar eller golv utbildade tyder på att korrosiv verkan är tillräcklig för deras utformning.

Fasettmönster utbildat i kalkstenslager mellanlagrat av mer än en halv meter utskjutande tunna skikt av fyllitisk grönskiffer tyder på samma sak (fig. 58).

Flytfasetter förenade till långa fåror, vars längd överstiger avståndet mellan två intill varandra liggande ryggar, kallas flutes (Curl 1964). Fårorna är således vinkelräta mot vattnets rörelse. Flytfasetter klassificeras enligt Böglis(1960) system som grottkarren.

V 8.4.5. Korrosionskolkar

Korrosionskolkar är håligheter vilka oftast uppträder i samband med smala sprickor både på väggar, golv och tak. Diametern och djupet varierar mellan ca 5 cm och 50 cm. De har enligt Bögli (1960) utbildats genom blandningskorrosion under freatiska förhållanden (fig. 59-60). Virvelbildningar i samband med sprickor och ojämnheter samt korrasiv verkan av suspenderat material kan dock ha varit av en viss betydelse.

Fig. 59. Korrosionskolkar i ett takparti.
Solution pockets in cave roof.

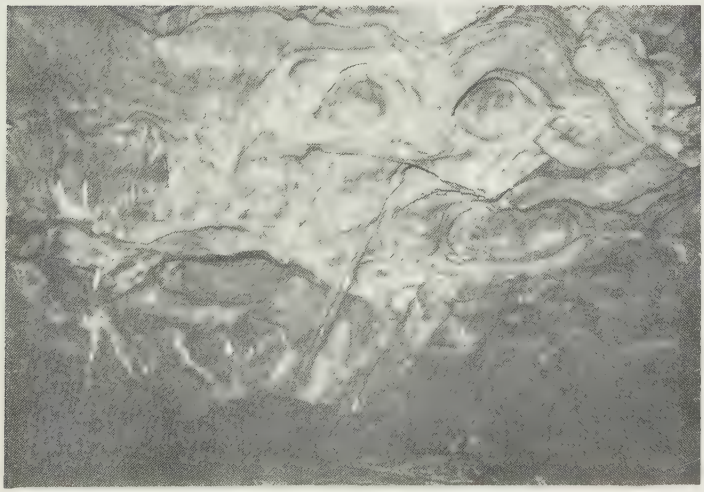


Fig. 60. Korrosionskolkar och droppsten i ett takparti.
Solution pockets and dripstones in cave roof.

V 8.4.6. Grottkarren

Med grottkarren avses här karrenfåror utbildade längs en del av grottans väggar av framsipprande infiltrationsvatten vilket fortfarande är aggressivt nog att lösa $CaCO_3$. De förekommer särskilt markant på sträckan G-I.

V 8.5. Ackumulativa former

De ackumulativa formerna består av alloktont material, dvs. sediment som förts in i grottan med vadöst eller freatiskt vatten, och autoktont material. Med det senare avses material som har sitt ursprung i själva kalkstensmassivet men omdeponerats i grottan. Hit hör olika typer av kalkstensdepositioner, rasmaterial och residualt material vilket senare är den olösliga rest som blivit över då kalksten lösts.

V 8.5.1. Alloktont material

Den största anhopningen av alloktona sediment återfinns i det fossila system som ansluter sig till huvudgången vid Ö. Stora delar av den drygt 15 m långa och 10-15 m breda salen vid p-r är täckt med 2-4 m mäktiga sandbankar. Bankarna är väl skiktade och uppvisar också diskordanta skikt. Kornstorleken varierar mellan skikten från grovmo till fingrus. Huvudbeståndsdelen utgörs emellertid av mellansand. De vertikala väggarna i den blinda sidogången mellan p och q är täckta från golv till tak av ett ca 3 cm till 50 cm tjockt sandlager. Lagret är välskiktat och fullkomligt orört trots att utrymmet mellan väggarna i den smala gången, som tidigare måste ha varit fylld med sand, bara kan ha eroderatsfram av rinnande vatten eller blottlagts genom någon form av instörtning av den underliggande grunden. Sandskiktens hållfasthet förklaras av att sandkornen cementerats ihop av utfälld $CaCO_3$. Sedimenten har transporterats till sin plats under ett tidigare skede av grottans historia innan det rinnande vattnet övergav de fossila systemen och utbildade sina nuvarande dräneringsvägar.

Ett mellanting mellan alloktont och autoktont material utgörs av det lermaterial som transporteras in i grottan med infiltrationsvatten från markytan. Lermaterialet kan hänföras till det jordlager som täcker markyta och sprickor samt de vittringsrester som

blivit över då kalkstenen lösts av det nedsipprande vattnet. Denna typ av avlagringar återfinns framförallt i de på väggarna närmast markytan belägna delarna av grottan såsom Lergrottan och delar av de fossila systemen.

V 8.5.2. Autoktont material

Det autoktona materialet i grottan representeras som nämnts av vittringsrester, rasmaterial och olika typer av $CaCO_3$ utfällningar.

V 8.5.2.1. Vittringsrester

Vittringsrester återfinns i delar av de fossila systemen i form av 0,5-3 cm tjocka lager av varierande färg och sammansättning. I den fossila sidogång som står i kontakt med huvudgången vid C är väggar, golv och tak täckta med ett 2-3 cm tjockt gulbrunt lager av en porös vattenhållande massa. Under denna antager kalkstenen sitt normala utseende. Materialets kalciumhalt är låg (tab. 15). Vittringsmassan torde utgöra en rest utbildad i samband med att kondensvatten löst kalkstenen. I viss mån kan också mycket långsamt nedsipprande infiltrationsvatten medverkat vid lösningen och borttransporten av $CaCO_3$. Hela erosionsprocessen måste ske utomordentligt långsamt för att vittringsmassan skall lämnas kvar mer eller mindre in situ.

Tabell 15. Analysresultat av vittringsmassan i fossila sidogången vid C(1) samt lermaterialet från rasmaterialet vid Y-Z(2). Analyserna har utförts av Zoltan Solyum vid Mineralogiska och Petrologiska Institutionen vid Lunds Universitet (jfr. tab. 1).

	% CaO	% MgO	% Fe_2O_3+FeO	% CO_2	Rest
1.	3,5	6,3	4,2	12,8	73,2
2.	6,3	3,9	5,7	6,6	77,5

Viktprocenten under "rest" kan i första hand hänföras till SiO_2, Na_2O och Al_2O_3.

Vid den stora rasackumulationen Y-Z återfinns upp till metertjocka anhopningar av ett till synes grått, lerigt och vattenhaltigt material. Det uppvisar ingen sedimentstruktur utan är snarare kornigt

Fig. 61. Rasmaterial vid n_1 - n_2.
Collapses at n_1 - n_2. Block breakdown.

Fig. 62. Ras i skiktfogarna vid AE.
Slab breakdown at AE.

och med största säkerhet utbildat på platsen. Inbäddat i materialet ligger stora block, stenar och skärvor av kalksten och skiffer. Block, stenar och skärvor bestående av kalksten är ofta täckta av ett 0,1-1,0 cm tjockt lager fyllitisk skiffer på den sida som vätter upp mot taket.Efter kornstorleksanalys av den "leriga" massan visade den sig vara moig - sandig. Viktsprocenten material finare än mellansand uppgick till nästan 40 medan andelen mellansand-grovsand var drygt 45%. Den kemiska sammansättningen framgår av tabell 15.

V 8.5.2.2. Rasackumulationer

Rasackumulationer återfinns i större eller mindre omfattning nästan överallt i grottan (fig. 61-62). De omfattar allt från mindre stenar och block som rasat ned från väggar och tak till instörtningar av större takpartier. De största anhopningarna av rasmaterial finns vid Y-Z, rastratten vid Ö vilken förbinder huvudgången med ovanförliggande fossila gångsystem samt vid förbindelsen mellan "Djävulskratern" och huvudgången. I dessa zoner har enorma kalkstensskikt lossat längs skiktfogarna, störtat till marken och brutits sönder. Då delar av det nedrasade materialet lösts och transporterats bort har resultatet slutligen blivit förstorade salar ofta med välvda tak. Ras vid grottans ingång A samt raszonen vid Ö och "Djävulskratern" är förutom av korrosion i hög grad orsakade av frostvittring. Temperaturen i dessa raszoner pendlar kring 0° C under stora delar av vinterhalvåret.

V 8.5.2.3. Kalciumkarbonatutfällningar

Huvudmineralet i de flesta kalkutfällningar i grottor är kalcit i kristallin form. Den utfälls genom att störningar i jämviktsförhållandena mellan vattnet, den lösta kalken och koldioxiden ger upphov till att dess löslighetsprodukt överskrides. Detta kan ske antingen genom att vatten som kommer i kontakt med grottans atmosfär avdunstar, vilket får till följd att jonkoncentrationen i vattnet ökar tills löslighetsprodukten överskrids och $CaCO_3$ fälls ut, eller genom att det vatten som infiltrerats via vegetation, humus och jordtäcke har en högre CO_2-halt än grottatmosfären varvid vattnet avger CO_2 och $CaCO_3$ utfälls. Den form $CaCO_3$ utfällningen erhåller är huvudsakligen beroende av typen och mängden av det vatten i

vilket utfällningen skett.

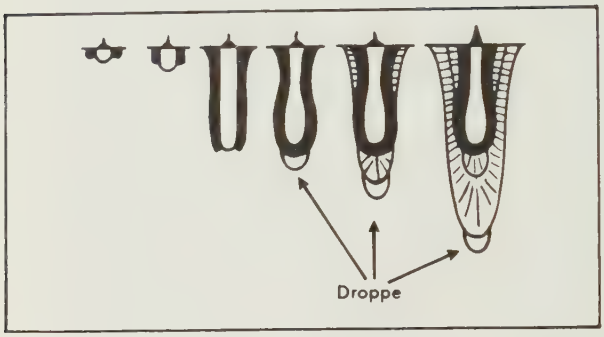


Fig. 63. Utvecklingen av en stråstalagtit, blockage av kapillärröret och utbildandet av en konisk stalagtit.

Development of a straw stalactite, blockage of capillary and growth to conical form (efter Jennings 1971).

Från taket droppande vatten kan genom utfällning ge upphov till stalagtiter av olika former. Den vanligast förekommande i Sotsbäcksgrottan är stråstalagtiten vars längd är ca 3-10 cm och diameter 5-10 mm (fig. 64). Dess genes framgår av figur 63. Om det vattenledande röret i stalagtitens centrum av någon anledning täpps till, t.ex. av ett sandkorn, kan utfällningen av $CaCO_3$ ske på utsidan av stalagtiten varvid dess form blir oregelbundet lökformig. Om vattenflödet är så snabbt att $CaCO_3$ inte hinner utfällas innan droppen lämnat taket utan först då den når golvet bildas en stalagmit (fig. 65).

Vatten som rinner i en smal rännil längs ett sluttande tak eller en vägg kan ge upphov till s.k. draperier genom att $CaCO_3$ fälls ut i en lång sträng. Nästa rännil lägger på ytterligare ett lager $CaCO_3$ o.s.v. (fig. 65). I grottan finns också ett fåtal helectiter, eller s.k. exentriska droppstenar, utbildade. Dessa är oregelbundna stalagtiter som växer helt oberoende av gravitationskraften varför de kan vara vridna i alla riktningar (fig. 63). De är enligt Moore (1964) bildade av vatten som under hydrostatiskt tryck sipprar fram ur mikroskopiska sprickor. Flödeshastigheten är så låg att vattendroppar inte bildas varför gravitationskraften inte på-

Fig. 64. Stråstalagtit och små helectiter.
Straw stalactite and small helectites.

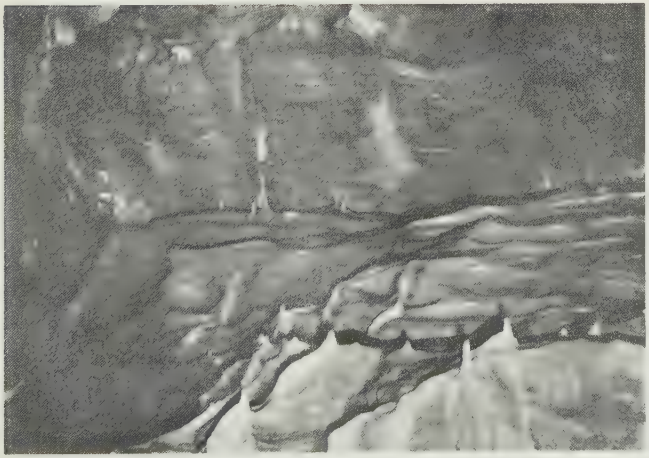


Fig. 65. Draperier och en ca. 10 cm hög stalagmit.
Draperies and a c. 10 cm high stalagmite.

Fig. 66. Grottkoralliknande former
Forms looking like cave corall or "popcorn".

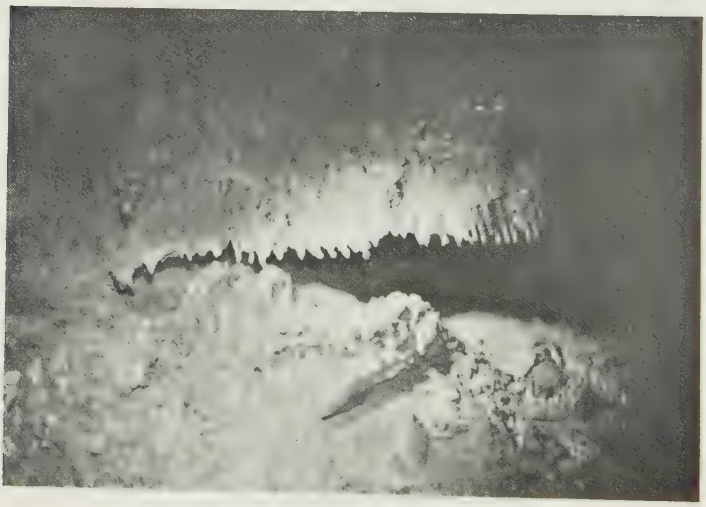


Fig. 67. 1-2 cm långa stalagtitliknande kalkutfällningar på lera och sand.

1-2 cm long $CaCO_3$ deposits on sand and clay.

verkar dess utformning. Helectiter är också kända under namnet anemoliter då man tidigare antagit att deras form varit beroende av olika vindströmningar (Sweeting 1972). Ytterligare en form vars bildning är oberoende av gravitationen finns representerad på block och väggar bl.a. i delar av det fossila system som står i förbindelse med huvudgången vid Ö. Här har 2-3 cm höga $CaCO_3$ utfällningar bildats bestående av rödgula klot, med en diameter på 3-7 mm, vilka via avsmalnande skaft är fästa vid berggrunden. Skaften är vid sin bas bara någon mm tjocka. Liknande former har beskrivits under namnet "grottkorall" eller "popcorn" av bl.a. Thrailkill (1965) och anses genetiskt vara närbesläktade med helectiterna (fig. 66). Kalkutfällningar på lera och sand i form av centimeterlånga stalagtitliknande bildningar är inte ovanliga (fig. 67).

Huvuddelen av de i grottan funna $CaCO_3$ utfällningarna förekommer mellan Y-Å samt i det ovanför Ö belägna fossila systemet. Det totala antalet stalagtiter har uppskattats till drygt 200, med en genomsnittlig längd på ca 10 cm. Bara en stalagmit, mellan s och t, har hittats. Dess höjd uppgår till ca 10 cm.

V 8.6. Grottans klimatförhållanden

Temperaturen varierar längs huvudgången A-AE under sommarmånaderna kring 5-10° C med ett medelvärde på ca +8° C strax före vattenfallet D. Temperaturen sjunker därefter långsamt för att vid Ä variera kring 4-5° C. De inre delarna av grottan influeras i hög grad av kall luft vilken tränger ned från den snötäckta Djävulskratern. Luftfuktigheten längs huvudgången antager värden mellan 90 och 100%. Under vintermätningen 1970 låg temperaturen i det närmaste konstant på +2° C utom vid ingången och de innersta delarna där den varierade kring nollstrecket. Luftfuktigheten under samma period var ca 90%. De fossila systemen uppvisade både under vinter- och sommarmätningar en temperatur på 0-3° C och en lugtfuktighet på 80-90%.

Vid besök i grottan i början av december 1970 och 1971 var grottan i det närmaste fylld med snö till taket under en stäcka av ca 30 m från ingången. Mellan snöytan och taket fanns en trång varmluftskanal vilken ledde varmluft mot ingången.

V 8.7. Diskussion och jämförelser

Det finns ingen anledning att förmoda att grottans olika nivåer, representerade av de äldre fossila systemen och den yngre huvudgången, utgör två olika faser i grottans utveckling. På grund av gångarnas läge och morfologi samt berggrundens strykning och stupning kan man snarare antaga att vattnet efterhand som erosionen fortgått arbetat sig djupare ner i lagrens stupningsriktning längs sprickor och skiktfogar för att slutligen helt torrlägga de övre gångsystemen. I det ögonblick som freatiskt anlagda gångar blivit så stora att dess vattenförande förmåga överskridit tillgången på vatten har deras form modifierats av vadöst vatten, varvid erosionen koncentrerats till deras botten vilket ytterligare bidragit till att högre liggande gångsystem övergivits. Det har inte gått att relatera gångsystemens höjdläge till fluktuationer i erosionsbasen så som skett i karstområden i t.ex. England och Tjeckoslovakien (Warwick 1960, Waltham 1971, Štelcl 1963).

Vid en jämförelse mellan Sotsbäcksgrottan och de av Rasmusson (1957) beskrivna grottorna vid Torne Träsk finner man stora överensstämmelser i fråga om morfologi och grottornas beroende av sprickor och skiktfogar. Rasmusson anser att huvudskedet i bl.a. Lullihatjårrogrottans utbildande med största sannolikhet kan förläggas till tiden för inlandsisens avsmältning inom området.

I Norge befintliga karstgrottor anses vara utbildade under eller efter den senatse nedisningen (Oxaal 1914, 1918, Horn 1935, 1947, Hjorthen 1968). Existensen av i kalksten befintligt cirkulerande grundvatten i permafrostmiljö har påvisats på Västspetsbergen av bl.a. Orvin (1944) och Baranowski (1973). De stora sedimentanhopningarna i Sotsbäcksgrottan ger en antydan om att delar av de fossila gångsystemen antagit sina nuvarande dimensioner redan under slutskedet av inlandsisens avsmältning från området då tillgången på sedimentförande vatten varit stor.

En grov uppskattning av grottans maximiålder kan erhållas på följande sätt. Gångarnas sammanlagda längd mellan A-AE är ca 1500 m. Den genomsnittliga bredden har uppskattats till 5 m och höjden till 4 m vilket ger en volym på ca 30 000 m^3. Om grottan förmodas antaga samma proportioner hela vägen till utloppet U_1 och det underjordiska dräneringsavståndet mellan sluket S_1 och utloppet U_1 antages

vara 5 000 m (horisontella avståndet S_1-U_1 är 2200 m) dvs. 10 ggr större än sträckan A-AE blir den totala grottvolymen mellan inlopp och utlopp 300 000 m^3. Om man sedan tar fasta på månadstransporten från området i augusti (tab. 12), då halten infiltrationsvatten i dräneringssystemet är minimal (fig. 27) och således huvudparten av den $CaCO_3$ som transporteras ut vid U_1 lösts längs grottans huvudgång, kan årstransporten uppskattas till 10 m^3. Under dessa förutsättningar skulle vattnet behöva 30 000 år för att bilda grottsystemet. Siffran är i hög grad överdriven eftersom måttet på grottvolymen troligen är överdrivet, den kemiska transporten är tilltagen i underkant och eftersom ingen hänsyn tagits till den mekaniska erosionens betydelse. Huvudskedet i grottans bildning kan därför med en stor sannolikhet förläggas till sen- och postglacial tid. Initialskedet i grottans bildande kan emellertid förläggas avsevärt längre tillbaka i tiden. Varaktigheten av detta skede, då ytterst små mängder vatten kunde tränga fram genom hydrografiskt verksamma hålrum i berggrunden, är ytterst svårbedömt. Den anförda uppskattningen av grottans maximiålder förutsätter således att detta initialskede redan passerats.

V 9. SLUTSATSER

Som ett resultat av undersökningarna på Artfjället kan följande slutsatser dragas:

1. Karstlandskapet har en hög permeabilitet med ett väl utvecklat underjordiskt dräneringssystem av vadös karaktär. Källorna, vilka kan grupperas till tre skilda nivåer, står under hydrostatiskt tryck. De låga källkoefficienterna antyder att källorna är bundna till grundvattenhorisonter.
2. Landskapet uppvisar, trots att det är beläget i en arktisk miljö, ett stort antal karstmorfologiska drag. Depressionstätheten är stor i jämförelse med karstområden med annorlunda klimat. Storleken på depressionerna är emellertid liten vilket resulterar i relativt låga värden på perforeringsindex R_p. Olika typer av karren förekommer men uppträder sparsamt.
3. Den kemiska denudationshastigheten är relativt hög i jämförelse med presenterade resultat från arktiska områden och med en del av de resultat som presenterats från varmare latituder trots att vattnets hårdhetsvärden är låga. Denudationsintensiteten anses

i första hand vara beroende av områdets nederbörds- och avrinningsförhållanden.

4. Totalhårdheten och karbonathårdheten, uttryckt i mg $CaCO_3/l$, är omvänt beroende av vattenföringen. Förhållandet kan beskrivas med funktionen $y = ax^b$. Dess utseende tycks i första hand vara beroende av dräneringssystemets karakteristika och variationerna i vattentemperatur. Vid beräkningar av denudationen måste detta förhållande fastställas och utnyttjas.
5. Huvuddelen av den kemiska årstransporten äger rum under vårsmältningen då andelen infiltrationsvatten i det subterrana dräneringssystemet är som störst.
6. Vattnet är fortfarande aggressivt när det når karstkällorna, framförallt beroende på höga vattenhastigheter. Låga vattentemperaturer ger, som en följd av låga reaktionshastigheter, samma effekt dvs. aggressivt vatten med låg totalhårdhet.
7. Sotsbäcksgrottan, vilken uppvisar både vadösa och freatiska drag, har utvecklats kontinuerligt varvid högre liggande, nu fossila system övergivits då vattnet via skiktfogar och sprickor eroderats ned till nuvarande nivå.
8. Huvudskedet i det subterrana dräneringssystemets utveckling förmodas ha inträffat i samband med inlandsisens avsmältning inom området. Delar av systemet är troligen utbildade subglacialt.
9. Morfologiska riktningselement inom området, så som orienteringen av karstdepressionernas longitudinella axlar och gångarnas orientering i Sotsbäcksgrottan, är intimt förknippade till berggrundens strykning och sprickorientering.

VI ISFJORD RADIO, VÄSTSPETSBERGEN. KORROSIONSINTENSITETSBERÄKNINGAR

VI 1. INLEDNING

Föreliggande presentation bygger på korrosionsanalyser utförda i ett dolomitiskt kalkstensområde vid Isfjord Radio (78° 04′N, 13° 38′O) på Västspetsbergen (fig. 68) under en vecka i augusti 1972. I första hand behandlas den kemiska denudationshastigheten samt sambandet mellan korrosion och vattenföring.

Fig. 68. Isfjord Radio, Västspetsbergen (78° 04′N, 13° 38′O).
Isfjord Radio, West Spitzbergen (78° 04′N, 13° 38′E) (efter Helldén 1973 a).

VI 2. GEOLOGI

Berggrunden ingår i Hecla-Hoek serien, vilken består av prekambriska-mellanordoviciska avlagringar vilka stryker i NV-SO riktning längs Västspetsbergens västkust. Bergarterna utgörs huvudsakligen av skiffrar, kvartsiter, dolomiter, konglomerater, tilliter och kalkstenar. Undersökningsområdet är uppbyggt av en mörkgrå proterozoisk kristallin dolomitisk kalksten (2 km^2) omgiven av eokambrisk-ordovicisk tillit och pelitiska bergarter (Flood et al. 1971).

Ca 75% av ytan är täckt med strandvallsgrus, svallad morän och frostvittrad jord till ett djup mellan 2 och 30 cm. Jordarterna är mycket kalkrika. Humustäckets tjocklek varierar mellan 0-13 cm med ett troligt medelvärde på 1-2 cm.

VI 3. KLIMAT

Enligt Köppens (1936) klassificeringssystem är Spetsbergens klimat av typ ET, tundraklimat. Närmaste klimatstation, Isfjord Radio, är belägen bara 2,5 km från undersökningsområdets centrum. Vid beräkning av årsmedelnederbörden för 1934-1940, 1947-1968 erhålles ett värde på 389 mm, medan årsmedeltemperaturen låter sig beräknas till -4,9° C för åren 1911-1968. Temperaturens och nederbördens fördel-

ning under året för perioden 1946-65 framgår av uppställningen nedan (tab. 16) (Steffensen 1969) varvid bör observeras att ensast fyra månader är frostfria och att det således bara är under denna tid som de kemiska processerna kan verka.

Tabell 16. Månadsmedelvärden för temperatur och nederbörd vid Isfjord Radio, för perioden 1946-1965 (efter Steffensen 1969).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Temp. °C	-10,9	-11,2	-12,1	-8,8	-3,3	1,7	4,5	4,2	1,1	-2,7	-6,2	-9,0
Nb. mm	29	30	33	17	20	24	30	38	38	46	39	34

De genomsnittliga månadsvärdena på luftfuktigheten varierar mellan 80 och 95% med maximum under sommarmånaderna. För beräkning av den kemiska denudationshastigheten krävs ett mått på evapotranspirationen för att ett godtagbart värde på den effektiva avrinningen skall kunna erhållas. Corbel (1960) anger evapotranspirationen till 50 mm vid en årsmedelnederbörd på 350 mm för Kongsfjorden på Västspetsbergen dvs. 16,7%, medan Smith (1969) för nordvästra Somerset-Island (74°N) i Canada anger värdet 39 mm vid en årsmedelnederbörd på 129 mm, dvs. en evapotranspiration på drygt 30%. Sellers (1965) anger ett generellt värde på ca 100 mm för 78°N och Trewarta (1968) ca 80 mm för samma breddgrad dvs. 26% respektive 20,6% av årsnederbörden 389 mm. Om man använder Corbels, Sellers och Trewartas värden som utgångspunkt för en beräkning av evapotranspirationen vid Isfjord Radio erhålles ett approximativt medelvärde på 20% motsvarande 82 mm.

VI 4. MORFOLOGI

Det undersökta dräneringsområdet, 1,28 km^2, utgör en del av strandflaten vilken vid Isfjord Radio är nästan 3 km bred och har en genomsnittlig höjd över havet på 4,5 m (fig. 69). Några karstformer står inte att finna på den mycket flacka ytan med undantag av en del mikrokarren på lösa block och stenar.

Området dräneras av två bäckar, dels mot norr via en liten bäck till Fyrsjön och dels mot väster via en bäck från "Dubbelsjön". Den senare bäcken mynnar, efter att ha brutit igenom ett par strandvallar, i havet. Den står för ca 70% av de två bäckarnas totala

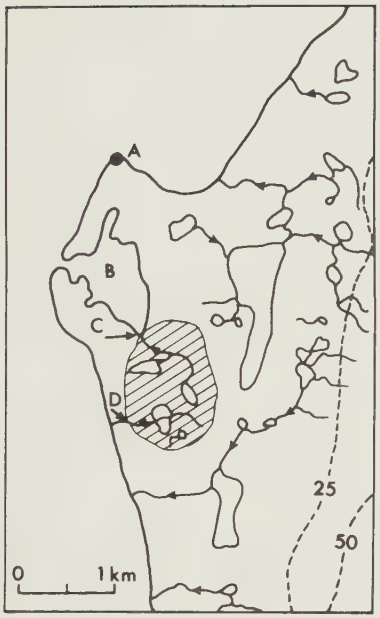


Fig. 69. A, Isfjord Radio. B, Fyrsjön. C, Provplats I. D, Provplats II. Skuggat område lika med det undersökta dräneringsområdet.

A, Isfjord Radio. B, Fyrsjön. C, Site I. D, Site II.
Lined area the drainage area studied. (efter Helldén 1973 a).

vattenföring.

Under smältperioden i juni är, enligt uppgift från personalen på Isfjord Radio, mycket stora delar av det flacka området täckt av grunda sjöar då de små bäckfårorna inte har kapacitet nog att transportera bort allt vatten i tillräcklig omfattning.

Det aktiva lagrets tjocklek varierar i mitten av augusti mellan 20 cm och 120 cm (vid Isfjord Radio) i de lösa jordarterna beroende på det isolerande humus-torvtäckets tjocklek.

Floran representeras huvudsakligen av mossor, säskilt Bryum-arter, tundragräs (Dupontia), dvärgstarr (Carex ursina) och ishavsstjärnblomman (Stellaria lumifusa) (Rönning 1964).

VI 5. METODIK

Vattenprover insamlades två gånger om dagen, samtidigt som vattentemperatur och vattenföring mättes, dels vid "Dubbelsjöns" utlopp i havet, provplats I, och dels vid den nordgående bäckens mynning i Fyrsjön, provplats II. Vattenproverna togs i E-kolvar av glas med gummipropp och analyserades inom 1,5 timma vid Isfjord Radio, för att i möjligaste mån förhindra att CO_2 diffusion mellan proverna

och atmosfären skulle hinna äga rum innan analyserna utförts.

Proverna har analyserats med avseende på pH, totalhårdhet och karbonathårdhet (alkalinitet). Ca^{+2} + Mg^{+2} koncentrationen bestämdes genom komplexometrisk hårdhetstitrering med EDTA och Eriochromsvart T medan karbonathårdheten (HCO_3^- + CO_3^-) fastställdes genom titrering med 0,1 N HCL som titrerlösning och Mischindikator nach Mortimer som indikator (Merck). Den maximala avvikelsen är beräknad till 0,06 mekv/l (motsvarande 3,0 mg $CaCO_3$/l) efter titrering mot standardlösningar. Den fria CO_2 halten har beräknats enligt Karlgrens (1962) metodik. (Se sidan 70). Kalciumhårdheten har uttryckts indirekt på grundval av bestämningen av karbonathårdhet. Vid mätning av pH har Metrohms ackumulatordrivna pH-meter E 488 med kombinerad glaselekrod av märket EA 152X använts. Då pH påverkas av Mg^{+2} halten i vatten, även vid mycket låga koncentrationer, har resultaten korrigerats för detta enligt beräkningar utförda av Picknett (1972). Procentsatserna Mg^{+2} räknat på Ca^{+2} varierar mellan 6,7% och 17,5% vilket ger en största pH korrektion på 0,03 skaldelar för mättade kalcitlösningar vid +10° C. De undersökta proverna är alla mättade och analyserade vid +10° C.

Den kemiska denudationshastigheten har beräknats dels med hjälp av Corbels (1959) formel (1) och dels med hjälp av den tidigare presenterade formel (2) som bygger på förhållandet mellan totalhårdhet och vattenföring.

$$X = E(T_c + T_m)\cdot(10\cdot D)^{-1} \qquad (1)$$

$$X = Tr_{c+m}\cdot t\cdot(D\cdot A\cdot 10^6)^{-1} \qquad (2)$$

Ett ungefärligt mått på vattnets aggressivitet har erhållits genom att utnyttja den s.k. Trombes kurva (Trombe 1952) senare modifierad av bl.a. Jacobson och Langmuir (1972).

VI 6. RESULTAT

Den genomsnittliga summan av $CaCO_3$ + $MgCO_3$ för provplats I blev 126,8 mg/l varvid 14,9% utgjordes av $MgCO_3$. Den genomsnittliga vattenföringen under perioden var 12,2 l/s. Motsvarande värden för provplats II var 133,9 mg/l, 18,5% respektive 5,1 l/s (tab. 17). Med ett medelvärde på resultaten från provplats I och II samt med en evapotranspiration på 82 mm och en bergartstäthet på 2,6 g/cm^3 kan den kemiska denudationen bestämmas, enligt Corbels formel (1),

till

X = 15,4 m^3/år och km^2 eller 15,4 mm/1000 år

Om man prickar in vattenföringen mot koncentrationen $CaCO_3$ + $MgCO_3$ erhålles ett negativt samband som för provplats II´s del antager formen av en kurva (fig. 70). Det torde vara vanskligt att draga några slutsatser av detta lilla material men resultaten av de tidigare presenterade mätserierna från Artfjället talar för att förhållande av detta slag verkligen existerar. Någon korrelation mellan vattentemperatur och koncentration har emellertid inte gått att erhålla.

Som framgår av figur 70 krävs det mycket små variationer i vattenföringen för att ge upphov till betydande förändringar i koncentrationen Ca^{+2} + Mg^{+2} inom det vattenföringsintervall som presenterats. Det är således av utomordentlig vikt för analysresultaten och för beräkningar av denudationen vid vilken vattenföring proverna har tagits.

Med tanke på att den totala årsnederbörden rinner av från undersökningsområdet under loppet av fyra månader blir den framräknade genomsnittliga effektiva avrinningen under denna tid 37,9 l/s medan den utslagen på 12 månader blir 12,6 l/s. Då bäcken vid provplats I står för ca 70% av den totala vattentransporten blir vattenföring-

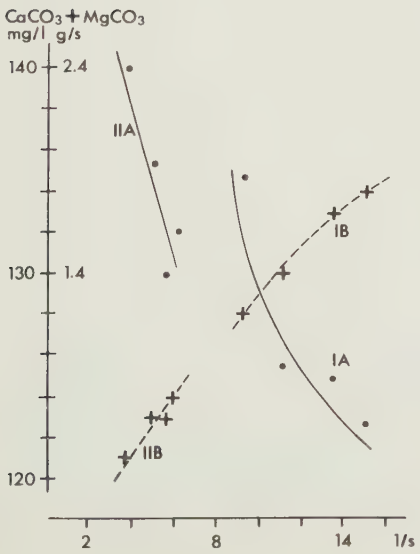


Fig. 70. Förhållandet mellan vattenföring och mg $CaCO_3$+$MgCO_3$/l illustrerat av 1 A och 2 A för provplats 1 respektive 2. Förhållandet mellan mängden transporterat material i g $CaCO_3$+$MgCO_3$/s är illustrerat av 1 B och 2 B för provplats 1 respektive 2.

The relationship between discharge and mg $CaCO_3$+$MgCO_3$ per litre is illustrated by 1 A and 2 A for sites 1 and 2 respectively. The relationship between transported material in g $CaCO_3$+$MgCO_3$ per second is illustrated by 1 B and 2 B for sites 1 and 2 respectively.

(efter Helldén 1973 a).

en vid denna plats 26,5 l/s respektive 8,8 l/s och för provplats II 11,4 l/s respektive 3,8 l/s för 4 respektive 12 månader. Om man går in i diagrammet figur 70 och extrapolerar för de ungefärliga transportvärden i g/s som svarar mot nämnda vattenföringar erhålles nedanstående värden på total kemisk transport och denudation beräknad enligt formel (2) (tab. 18). 12 månadersberäkningen förutsätter en vattencirkulation hela året och är medtagen för att belysa hur denudationen kan variera inom samma område för samma nederbörd och temperatur.

Tabell 18. Kemisk transport vid mätplats I och II, denudationshastigheten samt sammanlagda transporten från undersökningsområdet (1,28 km^2).
1; årsnederbörden avrinner under 12 månader.
2; årsnederbörden avrinner under 4 månader.

	Mätplats I	Mätplats II	Σtransport	Denudation
1. (12 månader)	14,4 m^3/år	5,5 m^3/år	19,9 m^3/år	15,5mm/1000 år
2. (4 månader)	9,6 m^3/år	5,0 m^3/år	14,6 m^3/år	11,4mm/1000 år

Om hänsyn tages till förhållandet vattenföring-koncentration blir den kemiska denudationen, på grundval av de genomsnittliga vattenföringsvärdena för 4 månader, enligt Corbels formel 11,8 mm/1000 år.

Ett närmevärde på denudationshastigheten är således, till följd av ovanstående resonemang 11 mm/1000 år (11,4 mm/1000 år). Värdet kan betraktas som något för högt till följd av att delar av vår/sommar avrinningen sker över snö och is utan möjlighet att reagera med berggrunden. Det framgår också att då avrinningen förmodas pågå året runt visar det erhållna denudationsvärdet 15,5 mm/1000 år, utomordentligt god överensstämmelse med det värde som räknats fram med hjälp av Corbels formel, 15,4 mm/1000 år. Det visar också mycket god överensstämmelse med det värde, 15,75 mm/1000 år, som presenterats av Corbel (1960) för Västspetsbergen. Det är emellertid uppenbart att beräkningar av denudationen i enlighet med Corbels metodik, vilken bygger på förutsättningen att vattnets hårdhet är mer eller mindre konstant under hela året, kan ge resultat som i hög grad avviker från verkligheten. Det är också intressant att notera att om det skulle existera en vattencirkulation under hela å-

ret skulle denudationen, på grund av att lägre vattenföring ger högre koncentration, bli högre än vad som nu är fallet, för samma årsnederbörd och temperatur. Skillnaden skulle dock inte bli särskilt stor.

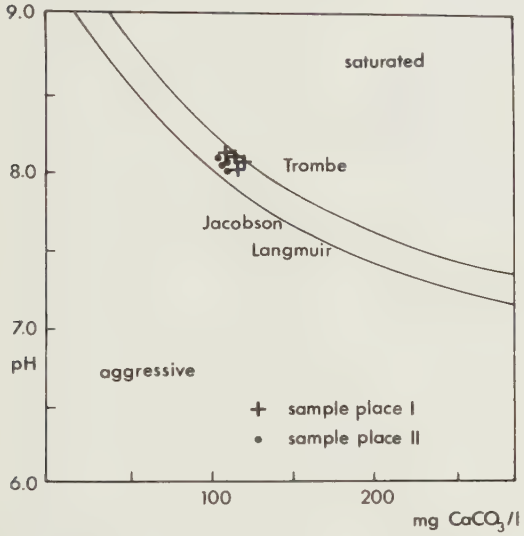


Fig. 71. Lösligheten av kalcit i vatten vid +10° C uttryckt i pH och Ca^{+2}-jon koncentration efter Trombe (1952) och Jacobson&Langmuir (1972). De plottade värdena indikerar mättade prover.

The solubilitity of calcit in pure water at +10° C in terms of pH and Ca^{+2}ion concentration from Trombe (1952) and Jacobson &Langmuir (1972). The values of the two streams plotted on the curves indicate saturated waters.
(efter Helldén 1973 a).

Trots de relativt låga vattentemperaturerna vilka ger förhållandevis låga reaktionshastigheter är vattnet när det når mätpunkterna redan mer eller mindre mättat (fig. 71). Bidragande orsaker till detta är dels vattnets låga cirkulationshastighet, en följd av den minimala lutningsgradienten, vilket de förmodade låga reaktionshastigheterna till trots ger vattnet längre tid att lösa berggrunden, dels de lösa kalkrika jordarterna och den frostvittrade berggrundens struktur vilka ger vattnet möjlighet att per liter verka över stora ytor. Vattnets förmåga att vid låga vattentemperaturer lösa mer CO_2 än vid höga är också av stor betydelse.

VI 7. DISKUSSION OCH JÄMFÖRELSER

Vid normalt atmosfäriskt tryck, 0,0003 atm, och en vattentemperatur på 0° C är en kalcitlösning mättad vid ca 95 mg $CaCO_3$/l medan motsvarande värde för +10° C är 74 mg $CaCO_3$/l (Sweeting 1972). Som tidigare påpekats så kan $CaCO_3$ halten i karstvatten vida överskrida dessa värden, så även i denna undersökning, och värden över-

Tabell 17. Analysresultat från provställe I och II i ett dolomitiskt kalkstensstråk vid Isfjord Radio, Västspetsbergen 1972. Results of the analyses at Spitzbergen.

Provställe I

dat	kl	pH	tot.h.	K.H.	Ca^{+2}	Mg^{+2}	CO_2	$CaCO_3$	$MgCO_3$	Q	v.t.	Mg^{+2} i % av Ca^{+2}	$CaCO_3+MgCO_3$	tr. $CaCO_3+MgCO_3$
			mekv/l	mekv/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	l/s	°C	%	mg/l	g/s
15/8	0130	8,10	2,78	2,21	44,2	6,8	1,9	110,5	24,1	9,2	+7,0	15,5	134,6	1,2
15/8	1800	8,05	2,50	2,25	45,0	3,0	2,1	112,5	10,1	15,0	+8,0	6,7	122,6	1,8
16/8	1330	8,10	2,56	2,22	44,4	4,1	1,9	111,0	14,4	11,1	+8,0	9,2	125,4	1,4
16/8	2300	8,10	2,56	2,15	43,0	4,9	1,9	107,5	17,3	13,5	+7,0	11,4	124,8	1,7

Provställe II

15/8	0130	8,00	2,88	2,23	44,6	7,8	2,5	111,5	27,4	3,8	+7,0	17,5	138,9	0,5
15/8	1800	8,10	2,68	2,13	42,6	6,6	1,9	106,5	23,2	5,6	+8,0	15,5	129,7	0,7
16/8	1330	8,10	2,72	2,19	43,8	6,4	1,9	109,5	22,4	6,0	+8,0	14,5	131,9	0,8
16/8	2300	8,10	2,80	2,18	43,6	7,4	1,9	109,0	26,2	5,0	+7,0	17,1	135,2	0,7

Värdet på pH har korrigerats för Mg^{+2} koncentrationerna efter Picknett (1972). Ca^{+2} halten är uttryckt indirekt på basis av karbonathårdheten.

Förkortningar: tot.h. = totalhårdhet (total hardness)
K.H. = karbonathårdhet (carbonate hardness)
Q = vattenföringen (water discharge)
v.t. = vattentemperatur (water temperature)
mekv/l = milliekvivalenter/l (milliequivalents/l)

skridande 200 mg $CaCO_3$/l är inte ovanliga (jfr. tabell 11). Som tidigare nämnts är vegetations- och humustäckenas CO_2 anrikande förmåga en av de viktigaste orsakerna till detta. Snötäckets roll som CO_2 producent har också diskuterats tidigare.

Corbel (1957, 1959) har för ett kallt, torrt arktiskt klimatområde presenterat ett medelvärde på den kemiska denudationen på 40 mm/1000 år vilket avviker starkt från de resultat han erhöll 1960 och från värdena i denna undersökning. En sammanställning av de erhållna resultaten och andra denudationsberäkningar från kalkstensområden i arktisk miljö ges i tabell 19 (jfr. tabell 14).

Tabell 19. Jämförande kemiska denudationsberäkningar från kalkstensområden i arktisk miljö.

	Denudation	Nederbörd
Västspetsbergen (Corbel 1957, 1959)	40 mm/1000 år	350 mm
Västspetsbergen (Corbel 1960)	15,75	350
Isfjord Radio räknat på 12 månader	15,5	389
Isfjord Radio räknat på 4 månader	11,4	389
Cambridge Bay, Canada (Corbel 1959)	5,0	-
Somerset Island (Smith 1969)	2,05	129

Varken Corbel eller Smith tycks ha tagit någon hänsyn till vid vilken vattenföring deras prover är tagna och därmed inte heller till förhållandet mellan totalhårdhet och vattenföring.

VI 8. SLUTSATSER

Trots den mycket korta mätserien och trots de extrapoleringar som gjorts samt att vederbörlig hänsyn inte tagits till viktiga faktorer som berggrundens kemiska och fysikaliska egenskaper, mikrofaunans och florans erosiva aktivitet kan dock följande fastslås:

- att förkarstningsintensiteten, på vilken den kemiska denudationshastigheten är ett indirekt mått, vid Isfjord Radio är låg i jämförelse med karstområden belägna i tropiska och tempererade klimatområden framför allt till följd av låg årsnederbörd, bristen på ett sammanhängande vegetations- och humustäcke vilket anses begränsa CO_2 tillgångarna samt den korta tidsperiod/år under vilken korrosionsprocesserna kan verka.

- att totalhårdheten tycks vara beroende av vattenföringen.
- att vattnet förlorat sin aggressivitet när det når mätpunkterna, trots de korta dräneringsvägarna, på grund av dess långa omsättningstid och den stora yta dolomitisk kalksten som varje liter verkar över som en följd av områdets fysikaliska egenskaper.
- att några karstformer, bortsett från en del mikrokarren, inte förekommer på grund av den låga denudationshastigheten, frostvittringens destruktiva verkan och den korta tid efter senaste nedisningen som processerna haft på sig att verka.

VII MORAVSKÝ KRAS, TJECKOSLOVAKIEN. KORROSIONSINTENSITETSBERÄKNINGAR

VII 1. INLEDNING

Nedanstående presentation bygger på fältarbete utfört under perioden februari-maj 1972 i norra delen av Moravský Kras i Mähren i Tjeckoslovakien (fig. 72). Undersökningens målsättning var att erhålla en bild av korrosionsförhållandena under våren och snösmältningen i Moravský Kras samt att erhålla jämförelsematerial till de tidigare redovisade resultaten.

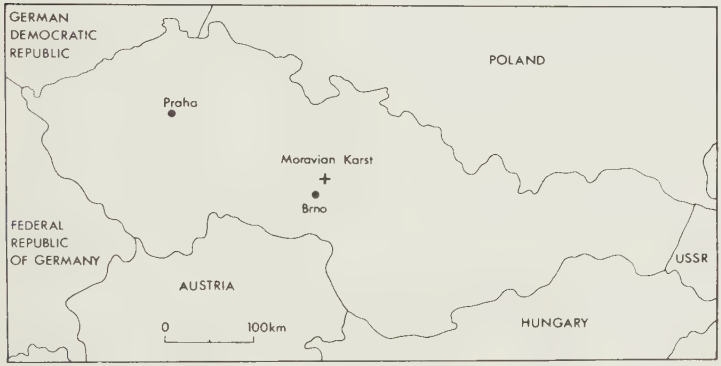


Fig. 72. Moravský Kras, Tjeckoslovakien.

Moravian Karst, Czechoslovakia.

Då Moravský Kras varit ett centrum för intensiv karstforskning under mycket lång tid och vid ett flertal tillfällen diskuterats i den internationella litteraturen ges nedan bara en kort sammanfattning av dess geologi, morfologi och klimatologiska förhållanden.

VII 2. GEOLOGI

Moravský Kras är beläget i sydöstra delen av Böhmiska massivet och gränsar till Karpaterna. Det är uppbyggt av en 2-6 km bred och 25 km lång kalkstenszon. Berggrunden inom undersökningsområdet, Punkvas dräneringssystem i norra delen av Moravský Kras, består av kalksten av mellan-överdevonisk ålder. Den genomsnittliga $CaCO_3$ halten varierar mellan 83 och 97% medan $MgCO_3$ halten varierar mellan 0,8 och 7,3% (Štelcl et al. 1969). I väster är kalkstenen underlagrad av Brno massivets basiska och vulkaniska bergarter troligen av proterozoisk ålder. I norr, öster och söder gränsar kalk-

stenen till skiffrar, gråvackor och konglomerater från undre karbon.

Kalkstenen stryker i NNO-SSV riktning. Under den variskiska orogenesen stördes den genom komplex veckning och genomsattes av förkastningar huvudsakligen med O-V och NV-SO strykning (Chlupáč 1966).

VII 3. KLIMAT

Klimatet i norra delen av Moravský Kras är enligt Köppens (1936) klassificering av typen Dfb, humidt kontinentalt klimat med svala somrar. I enlighet med Quitts (1971) indelning av Tjeckoslovakien i klimatzoner ingår undersökningsområdet i zonen MT3: "summer short, mild up to moderately cold, dry up to moderately dry, transition period normal up to long with mild spring and autumn, winter of normal length, mild up to moderately cold, dry up to moderately dry with normal up to short duration of snow cover".

Årsmedeltemperaturen för perioden 1901-1950 är +6,5^{o} C medan årsmedelnederbörden för samma period är 564 mm (Corbel et al. 1965). Om början och slutet av vintern karakteriseras av en dagsmedeltemperatur på 0° C, så varar vintern 100 dagar nämligen från 27 december till 6 mars. Sommarperioden, under vilken dagsmedeltemperaturen överskrider 15° C varar från 22 juni till 22 augusti (Quitt 1965).

Nederbördsmaximum inträffar under sommaren och minimum under vintern. Relativa fuktigheten varierar på sommaren kring 70% och under vintern mellan 85 och 90%.

VII 4. MORFOLOGI OCH HYDROLOGI

Karstområdet utgörs av en platå, 25 km^{2} och 500-530 m.ö.h., på vars yta lösningsdoliner, instörtningsdoliner och djupa schakt finns utbildade. Längs dess sluttningar uppträder karren, karrenfält, naturliga broar och isolerade erosionsrester (rock towers). I de marginella delarna av karstområdet har blinda och halvblinda dalar utvecklats. De senare kan ha en fortsättning i form av torrdalar vilka skär igenom området. De är mycket smala och canyonlika med bottnar vilka eroderats ner till ett djup av 150 m under platåytan. Ett stort antal grottor, utbildade i tydliga nivåer, har öppningar ut mot de branta dalsidorna. Botten av dalarna är

täckta med grusiga ackumulationer av pleistocen ålder vilka kan nå en mäktighet av upp till 56 m (Štelcl 1963).

I samband med de branta sluttningarna ligger kalkstenen normalt bar medan den för övrigt vanligen är täckt med vittringsmaterial och alloktona depositioner av varierande mäktighet, ursprung och ålder. En betydande del av Moravský Kras består av uppodlad mark. Bara de områden som inte är lämpade för jordbruk är bevuxna med skog och gräs. Vegetationstypen är i hög grad relaterad till topografin. De flacka platåytorna är täckta med bokskog men ersätts inom vissa områden, huvudsakligen i norra Moravský Kras, av granskog. Dalsidorna är bevuxna antingen med ek-bokskog eller ask-lönnskog på stenigt underlag. Den värmekrävande floran återfinns på skoglösa sydsluttningar vilka ibland uppvisar steppkaraktär. Alpin och subalpin flora är koncentrerad till de djupa, kalla och humida dalbottnarna (Raušer 1965).

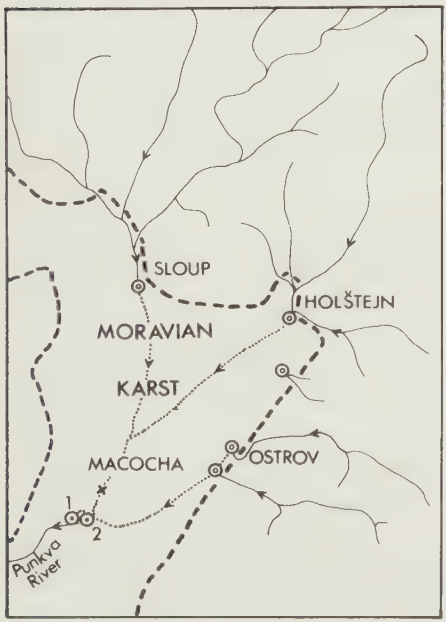


Fig. 73. Punkvas dräneringssystem.

Scheme of the Punkva River pattern (efter Raušer et al. 1965).

Undersökningsområdet utgör en del av Punkva flodens dräneringssystem vilken består av ett antal vattenflöden som rinner in i kalkstenszonen från kringliggande icke-karbonathaltiga berggrunder. Så snart som bäckarna via blinda och halvblinda dalar når sluken vid Sloup, Holštejn och Ostrov försvinner de underjordiskt för att å-

ter komma i dagen ca 5 km mot SV vid de två karstkällorna "Tunel" och Malý výtok (fig. 73).
Det vatten som slukas vid Sloup och Holstejn har sitt utlopp i "Tunel" vilket är ett artificiellt utlopp bestående av en 200 m lång tunnel vilken leder till turistgrottan Punkevní. Tunneln byggdes för att leda vatten från det naturliga utloppet till "Tunel" med avsikten att göra grottan mer tillgänglig för turismen. Det vatten som slukas vid Ostrov har sitt utlopp i Malý výtok beläget ca 30 m från "Tunel". Vid högvatten kan vatten från de två subterrana dräneringssystemen blandas (Corbel et al. 1965). Dräneringsområdenas yta framgår av tabell 20.

Tabell 20. Punkva flodens dräneringsområden (efter Raušer et al. 1965).

	Yta
Sloups dräneringsområde	58,3 km^2
Holštejns -"-	63,3
Ostrovs -"-	8,4
Kalkstensområdet mellan sluk och källor	25,0

Ett karakteristiskt landskapsdrag i Moravský Kras är Macochaschaktet, ett 138 m djupt schakt vilket utgör en del av grottsystemet Punkevní. Över dess botten rinner delar av det vatten som slukats vid Sloup och Holštejn via två sjöar, 15 och 25 m djupa, för att efter ca 50 m åter slukas och ingå i den subterrana vattencirkulationen. Ett flertal grottor på olika nivåer har öppningar i schaktets vertikala väggar.

Karstifieringen av landskapet anses ha ägt rum under minst fyra från varandra skilda perioder (Chlupáč 1966, Štelcl et al. 1969). Första gången Moravský Kras var exponerat för karstprocessernas verkan var under tiden mellan regressionen i nedre karbon och transgressionen i mellersta jura. De äldsta tecknen på karstifiering kan emellertid hänföras till lägre krita vilket kan betecknas som period 1. Period 2 inföll under paleogen och period 3 omedelbart före tortoniska havets transgression, dvs. före neogen. Period 4 omfattar de pliocena, pleistocena och holocena epokerna. Av dessa perioder anses period 3 ha varit av den största betydelsen

för landskapets nuvarande karaktär.

VII 5. METODIK

Vattenprover togs med ett intervall på ca 14 dagar under perioden februari-maj vid sluken Holštejn och Ostrov samt vid utloppen "Tunel" och Malý výtok. Samtidigt mättes vattentemperaturen samt vid de två utloppen dessutom vattenföringen. Då vattenföringsmätningarna inte kunde utföras kontinuerligt presenteras här i stället mätningar utförda av Hydrometeorologiska Institutet i Brno.

Vattenanalyserna utfördes av personal på Tjeckoslovakiska Vetenskapsakademiens Naturgeografiska Institutions vattenkemiska laboratorium i Brno. Proverna bestämdes med avseende på pH, totalhårdhet och kalciumhårdhet. Värdena på pH har senare modifierats för Mg^{+2} halt enligt Picknetts (1972) beräkningar.

Ett ungefärligt mått på vattnets aggressivitet har erhållits genom att utnyttja Trombes kurva (Trombe 1952) senare modifierad av bl.a. Jacobson et al. (1972).

Kemiska transporter samt hela dräneringsområdets denudationshastighet har beräknats med hjälp av formel (2); $X = Tr_{c+m} \cdot t \cdot (D \cdot A \cdot 10^6)^{-1}$.

VII 6. RESULTAT

VII 6.1. Vattnets kemiska och fysikaliska egenskaper

Förhållandet mellan kalciumhårdhet, uttryckt i mg $CaCO_3$/l, och vattenföring vid utloppen "Tunel" och Malý výtok framgår av figurerna 74-75. Förhållandet kan beskrivas med funktionen $y = ax^b$, där faktorerna a och b i första hand tycks vara beroende av dräneringssystemets karakteristika. Någon korrelation mellan vattenföring och totalhårdhet har, i motsats till förhållandena på Artfjället, inte kunnat påvisas, troligen på grund av de minimala temperaturfluktuationerna under mätningsperioden.

På grund av det angivna förhållandet, ger små variationer i vattenföringen, vid lågvatten, upphov till stora förändringar i kalciumhårdheten medan det vid högvatten krävs stora förändringar i vattenföringen för att några anmärkningsvärda variationer i kalciumhårdheten skall komma till stånd. Det framgår också av diagrammen hur kalciumtransporten, uttryckt i g $CaCO_3$/s ökar med vattenföring-

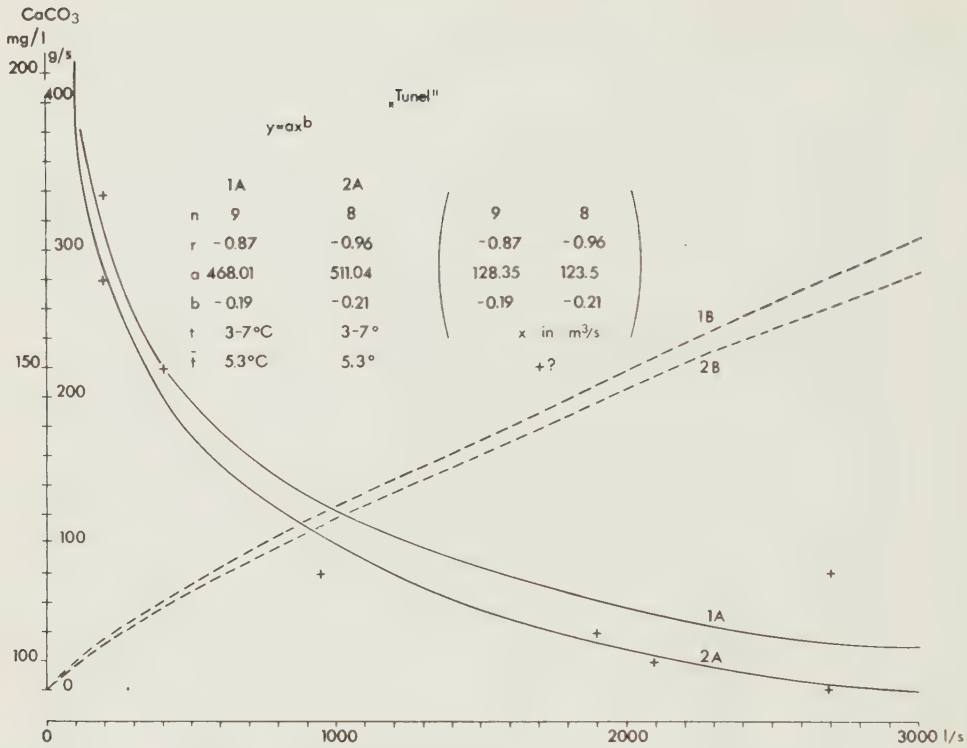


Fig. 74. Förhållandet mellan kalciumhårdhet (uttryckt i mg $CaCO_3$/l) och vattenföring illustreras av 1 A och 2 A för vattentemperaturintervallet t och genomsnittliga vattentemperaturen $\bar{t}$ vid karstkällan "Tunel". Kurvan 1 A illustrerar förhållandet då det med frågetecken markerade värdet är inkluderat medan 2 A illustrerar förhållandet då detta värde ej är medtaget. Förhållandet beskrivs med funktionen $y = ax^b$, där faktorerna a och b i första hand tycks vara beroende av dräneringssystemets karakteristika. n anger antalet utförda analyser och r korrelationskoefficienten. 1 B och 2 B visar förhållandet mellan transport och vattenföring. Kurvorna är konstruerade på basis av 1 A och 2 A. Inom parentes anges parametrarnas värden om vattenföringen uttrycks i m^3/s istället för l/s.

1 A and 2 A illustrate the relationship between calcium hardness (expressed in terms of mg $CaCO_3$/l) and water discharge for water temperature interval t, with the mean temperature $\bar{t}$, at karst spring "Tunel". The curve 1 A illustrates the relationship when the value marked with a question-mark is included while 2 A illustrates the relationship when this value is excluded. The relationship is described by means of the function $y=ax^b$, where the factors a and b seem to be dependent on the characteristics of the drainage system. n denotes for the number of observations and r the coefficient of correlation. 1 B and 2 B show the relationship between transport and water discharge. The curves are constructed on the basis of 1 A and 2 A. When water discharge is expressed in m^3/s instead of l/s the values of the parameters are shown in brackets.

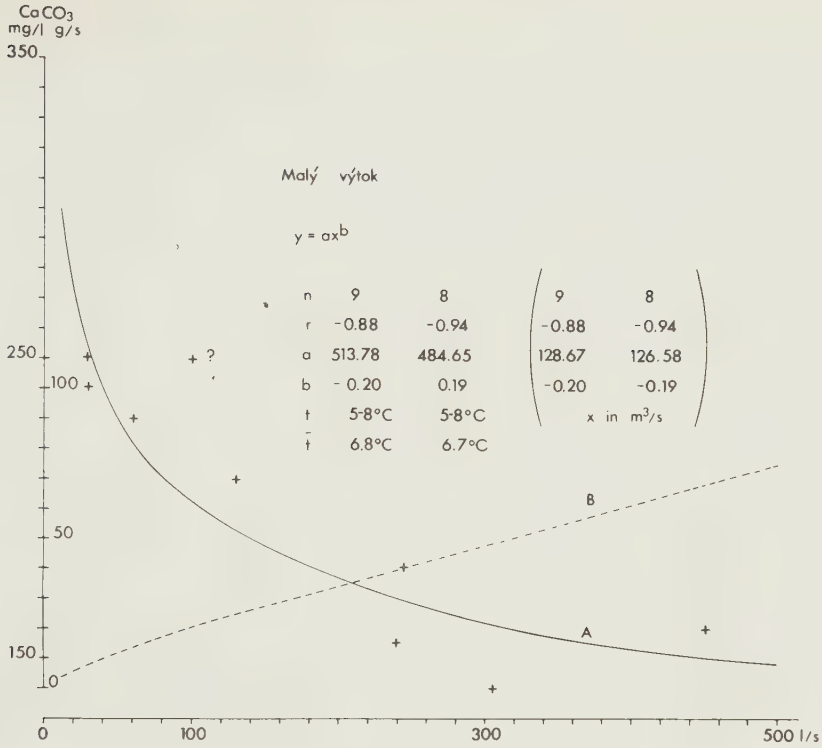


Fig. 75. Förhållandet mellan kalciumhårdhet (uttryckt i mg $CaCO_3/l$) och vattenföring illustreras av A för vattentemperaturintervallet t och medeltemperaturen $\bar{t}$ vid karstkällan Malý výtok. Förhållandet beskrivs med funktionen $y=ax^b$, där faktorerna a och b i första hand tycks vara beroende av dräneringssystemets karakteristika. n anger antalet utförda analyser och r korrelationskoefficienten. Kurvan är konstruerad för n=9. Inom parentes anges parametrarnas värden om vattenföringen uttrycks i m^3/s istället för l/s. B visar förhållandet mellan transport och vattenföring och är konstruerad på basis av A.

A illustrates the relationship between calcium hardness (expressed in terms of mg $CaCO_3/l$) and water discharge for the water temperature interval t, with the mean temperature $\bar{t}$, at karst spring Malý výtok. The relationship is described by means of the function $y=ax^b$, where the factors a and b seem to be dependent on the characteristics of the drainage system. When water discharge is expressed in m^3/s instead of l/s the values of the parameters are shown in brackets. n denotes for the number of observations and r the coefficient of correlation. B show the relationship between transport and water discharge and is constructed on the basis of A.

en. De värden som är markerade med frågetecken härrör sig från mätningar utförda den 14/2 1972. De har markerats på detta sätt på grundval av den stora avvikelsen från övriga värden. Orsaken behöver inte nödvändigtvis vara felaktigt utförda mätningar utan kan vara grundad på det förhållandet att grundvatten, vilket normalt inte deltar i den underjordiska cirkulationen och därför har en kalciumhalt som är större än normalt, tvingats ut under kraftigt tryck av en flodpuls. Funktionen $y = ax^b$ har beräknats både med och utan dessa värden.

Variationerna i pH, $CaCO_3$ och $MgCO_3$ koncentrationerna samt vattentemperaturernas förändringar under mätperioden framgår av figurerna 76-77. $CaCO_3$ koncentrationen vid Ostrov varierar mellan 85 och 130 mg/l. $MgCO_3$ koncentrationen ligger kring 60 mg/l och pH kring 7,3. Motsvarande värden för Holštejn är 80-100 mg $CaCO_3$/l, 30-80 mg $MgCO_3$/l och ett pH mellan 6,8 och 7,5 (fig. 76). Vattentemperaturen ökar långsamt från 0,2° C till 12,0° C (fig. 78). Sluken, framförallt Holštejn, tycks ha en markerad nedgång i jonkoncentration i slutet av februari när snösmältningen var som mest intensiv.

$CaCO_3$koncentrationen vid "Tunel" varierar mellan 95 och 180 mg/l och vid Malý výtok från 155 till 250 mg/l samtidigt som pH varierar mellan 6,5 och 7,5 (fig. 77). Halterna $MgCO_3$ antar i hög grad samma värden som vid sluken (fig. 76). Gemensamt för utloppen är ett karakteristiskt minimum i vattentemperatur (fig. 76) och koncentrationer under den intensiva snösmältningen i slutet av februari samtidigt som vattenföring och $CaCO_3$ transport antager maximala värden (fig. 77).

Samtliga prover från sluken Ostrov och Holštejn visade sig vara aggressiva medan proverna från utloppen "Tunel" och Malý výtok var mättade i högre grad framför allt vid lågvatten även om de flesta var aggressiva (fig. 79).

VII 6.2. Korrosionsintensitet

Den månatliga $CaCO_3$ transporten vid utloppet "Tunel" har beräknats för att erhålla en uppfattning om dess variationer under året. Transporten har beräknats på grundval av det erhållna förhållandet mellan transport och vattenföring och de vattenföringsmätningar

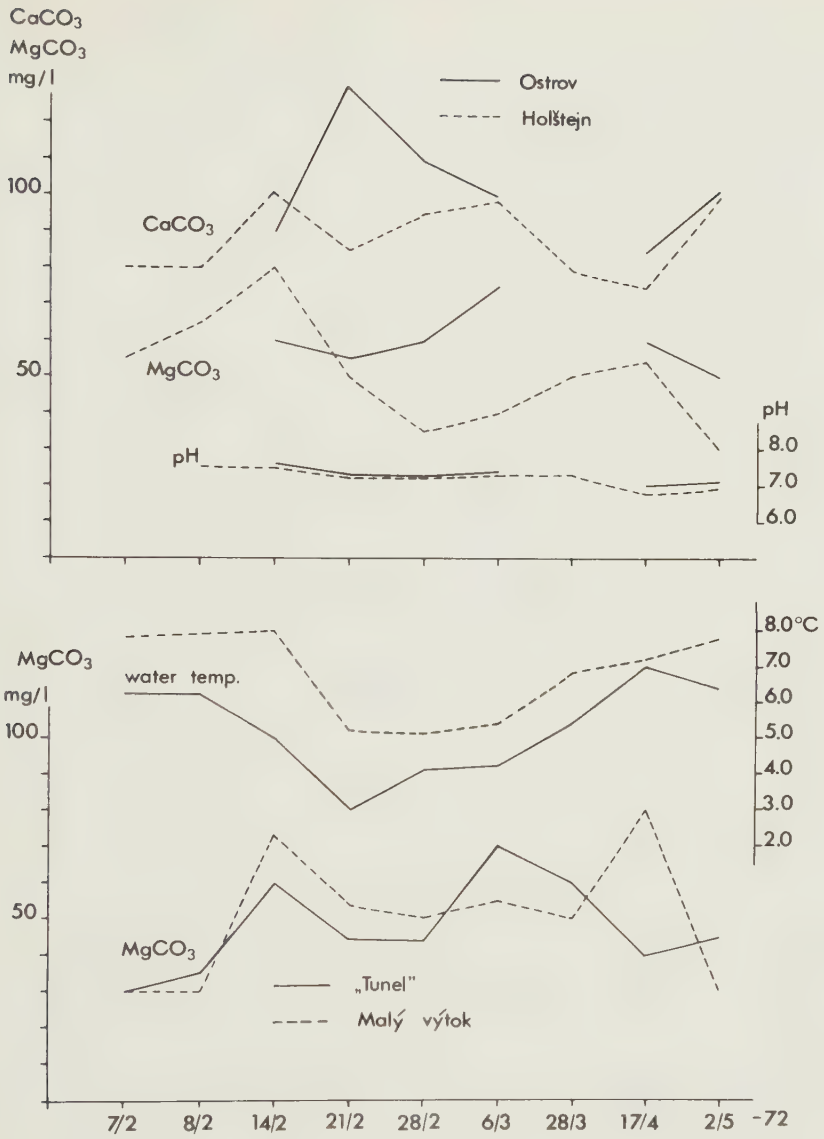


Fig. 76. OVAN. Variationerna i pH, kalciumhårdhet och magnesiumhårdhet vid sluken Ostrov och Holštejn.
NEDAN. Variationerna i vattentemperatur och magnesiumhårdhet vid karstkällorna "Tunel" och Malý výtok.

ABOVE. Variations in pH, calcium hardness and magnesium hardness at swallets Ostrov and Holštejn.
BELOW. Variations in watertemperature and magnesiumhardness at karst springs "Tunel" and Malý výtok.

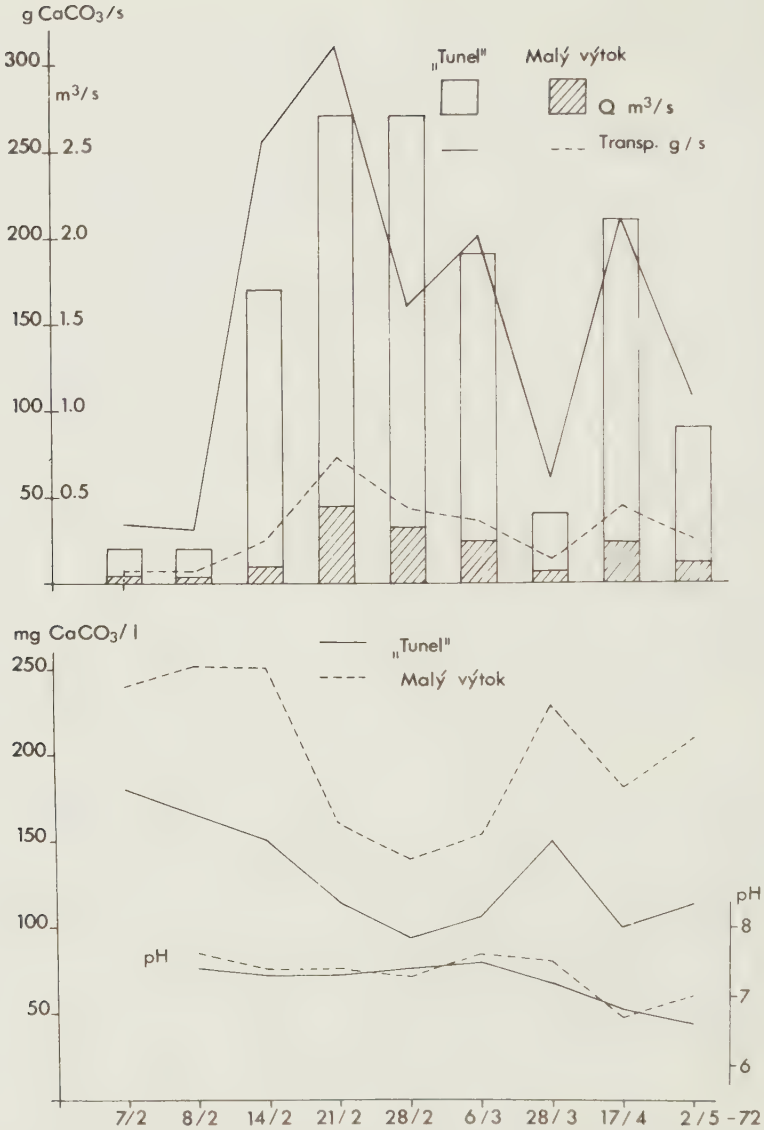


Fig. 77. OVAN. Variationerna i $CaCO_3$ transport och vattenföring vid karstkällorna "Tunel" och Malý výtok.
NEDAN. Variationerna i kalciumhårdhet och pH vid karstkällorna "Tunel" och Malý výtok.

ABOVE. Variations in $CaCO_3$ transport and waterdischarge at karstsprings "Tunel" and Malý výtok.
BELOW. Variations in pH and calcium hardness at karstsprings "Tunel" and Malý výtok.

Fig. 78. Vattentemperaturens variationer under våren för sluken Ostrov och Holštejn.

Variations in water temperature during spring at the swallets Ostrov and Holštejn.

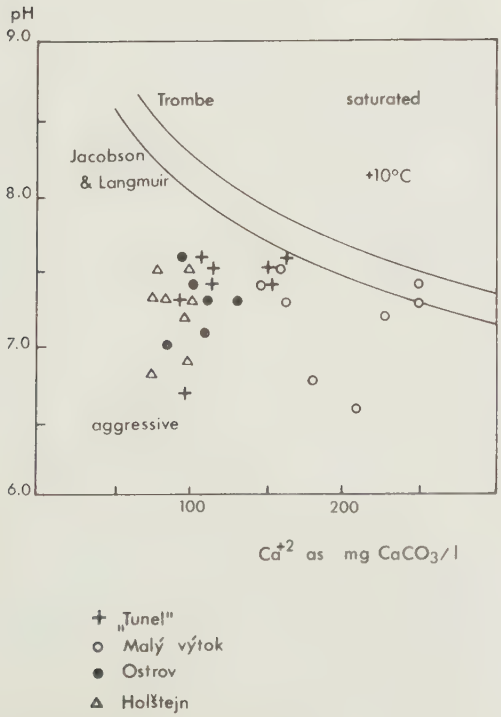
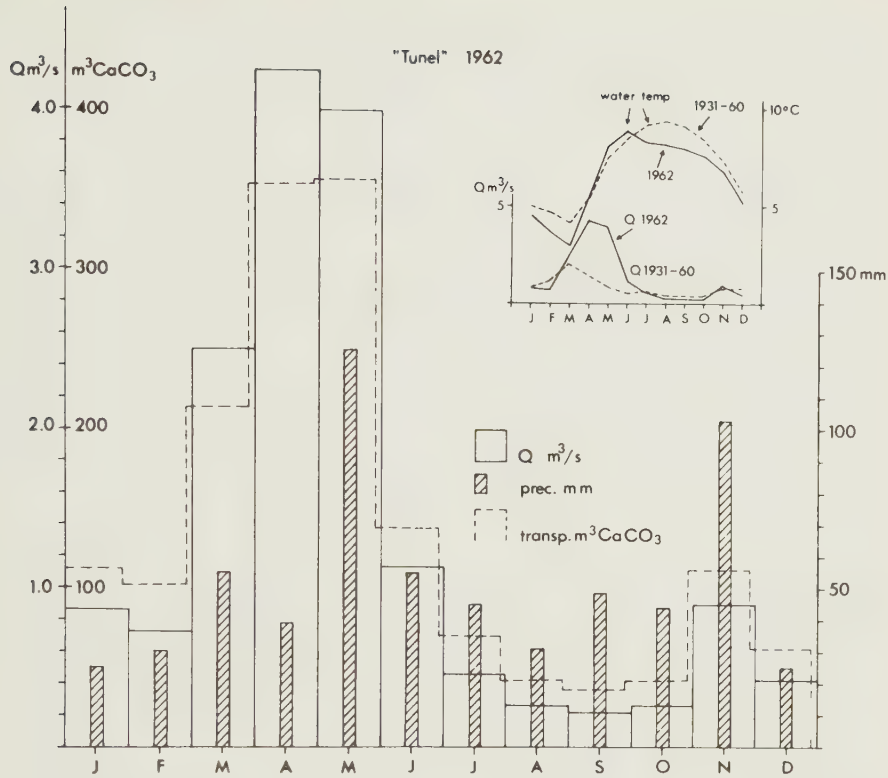


Fig. 79. Lösligheten av kalcit i rent vatten vid +10° C uttryckt i pH och Ca^{+2} jonkoncentration efter Trombe (1952) och Jacobson&Langmuir (1972). De plottade värdena indikerar huvudsakligen aggressivt vatten.

The solubility of calcit in pure water at +10° C in terms of pH and Ca^{+2} ion concentration from Trombe (1952) and Jacobson&Langmuir (1972). The values of the four streams plotted on the curves indicate aggressive waters mainly.

Fig. 80. Månatlig vattenföring, nederbörd och $CaCO_3$ transport vid "Tunel" för 1962. Vattenföringsvärdena är hämtade från Štelcl et al. (1969) och nederbördsvärdena från Raušer et al. (1965). I det infällda diagrammet visas vattentemperaturens och vattenföringens avvikelser från månadsmedelvärdena för perioden 1931-1960 efter Štelcl et al. (1969).

Mean monthly water discharge, precipitation and $CaCO_3$ transportation at karst spring "Tunel" during 1962. The water discharge values are taken from Štelcl et at. (1969) and the precipitation values from Raušer et al. (1965). The inserted diagram shows the deviation of the water temperature and the water discharge for 1962 from the mean monthly values for the period 1931-1960 after Štelcl et al. (1969).



som presenterats av Štelcl et al. (1969) för år 1962 (fig. 80).

Det är uppenbart att vattenföringen och $CaCO_3$ transporten antager maximala värden samtidigt under våren. Inte mindre än 56% av den årliga transporten äger rum under perioden mars-maj. De höga värdena kan i de flesta fall relateras till snösmältningsperioden på våren då stora mängder smältvatten infiltrerar kalkstensmassivet och ger upphov till en intensiv korrosion i vertikalled. Den vertikala erosionen i området har beräknats vara upp till 10 ggr större än erosionen i den horisontella vattencirkulationszonen (Raušer et al. 1965).

Med en täthet på kalkstenen belöpande sig till 2,7 g/cm^3 blir den totala $CaCO_3$ transporten vid "Tunel" 1653 m^3 för 1962. På grundval av att vattenföringen under 1962 avvek från månadsmedelvärdena för perioden 1931-1960 har transportvärdet reducerats med 14,5% enligt beräkningar utförda av Štelcl et al. (1969) varvid värdet 1413 m^3 erhållits. Den genomsnittliga denudationshastigheten för hela dräneringsområdet (155 km^2) inklusive den icke karbonathal-

tiga berggrunden blir då 9 (9,1) mm/1000 år. Samma värde för själva kalkstensområdet (25 km^2) blir 57 (56,5) mm/1000 år. Värdena stiger approximativt med 25% om $MgCO_3$ transporten medtages i beräkningarna.

Det bör observeras att de presenterade värdena inte ger en reell bild av den kemiska denudationen i Punkvas dräneringsområde eftersom transporten vid utloppet Malý výtok inte beräknats. För att erhålla ett värde på denudationshastigheten i området mellan sluk och källor måste ett diagram av samma typ som figurerna 74-75 konstrueras för varje sluk och källa och den genomsnittliga månadsvattenföringen måste beräknas. Först då är det möjligt att beräkna denudationen, efter att ha subtraherat transporten vid utloppen med transporten vid sluken, med hjälp av formel (2). Det finns anledning att påpeka att den totala kemiska transporten från ett kalkstensområde inte kan beräknas på grundval av skillnaden i jonkoncentration mellan sluk och utlopp. Två vattendrag med samma totalhårdhet men olika vattenföring har givetvis olika värden på den kemiska transporten.

VII 7. DISKUSSION OCH JÄMFÖRELSER

Det är av stort intresse att kunna konstatera att karstifieringen tycks vara mest intensiv på våren under snösmältningen då inte mindre än 56% av årstransporten $CaCO_3$ vid utloppet "Tunel" äger rum under bara tre månader. Resultatet visar god överensstämmelse med förhållandena på Artfjället där 67% av årstransporten äger rum under snösmältningsperioden maj-juli samtidigt som halten infiltrationsvatten i det subterrana dräneringssystemet antager maximala värden. Smältvattnets korrosiva förmåga är i första hand beroende av det förhållandet att varje liter vatten under infiltrationen kan verka över förhållandevis stora kalkstensytor i jämförelse med varje liter vatten i den horisontella cirkulationen samtidigt som halten infiltrationsvatten vid utloppen är stor under snösmältningen. Smältvattnets förmåga att lösa mer CO_2 än vatten vars CO_2 koncentration enbart är beroende av atmosfärens CO_2 tryck har tidigare behandlats.

Det finns bara ett fåtal värden på denudationshastigheten presenterade i den internationella litteraturen för det undersökta om-

rådet. Corbel et al. (1965) har beräknat den till 9 mm/1000 år för hela Punkvas dräneringssystem inklusive den icke karbonathaltiga berggrunden. Värdet visar exakt överensstämmelse med det här redovisade resultatet (9,1 mm/1000 år). För själva karstområdet presenterar Corbel et al. värdet 12 mm/1000 år medan Štelcl et al. (1969) anger värdet 25 (25,4) mm/1000 år för samma område. Båda har gjort sina beräkningar med utgångspunkt från utloppet "Tunel".

Det av Corbel et al. presenterade värdet bygger på beräkningar med hjälp av Corbels formel (1) vilken som nämnts grundar sig på årsmedelavrinning och erhållna medelvärden från utförda kemiska analyser utan att någon hänsyn tagits till det existerande förhållandet mellan vattenföring och karbonathårdhet. Metoden kan därför ge mycket missvisande och varierande resultat beroende på vid vilken vattenföring proverna tagits.

Det denudationvärde som presenterats av Štelcl et al. kan också ifrågasättas då det har beräknats på grundval av skillnaden i $CaCO_3$ koncentrationen mellan utlopp och sluk i stället för på skillnaden i transport. Att $CaCO_3$ koncentrationen är lika hög vid ett sluk som vid dess karstkälla innebär inte nödvändigtvis att kalksten inte löses mellan de två punkterna. Om vattenföringen är större vid utloppet än vid sluket är också transporten större vilket innebär att korrosion pågår. För övrigt visar de erhållna resultaten god överensstämmelse med de som tidigare presenterats av Raušer et al. (1965), Corbel et al. (1965) och Štelcl et al (1969).

VII 8. SLUTSATSER

Som ett resultat av undersökningarna i Moravský Kras kan följande slutsatser dragas:

1. Kalciumhårdheten, uttryckt i mg $CaCO_3$/l, är omvänt beroende av vattenföringen. Förhållandet kan beskrivas av funktionen $y = ax^b$ där faktorerna a och b tycks vara beroende av i första hand dräneringssystemets karakteristika. Något direkt samband mellan vattentemperatur och kalciumhårdhet har inte kunnat påvisas. Vid beräkningar av ett karstområdes förkarstningsintensitet, vilket denudationshastigheten anses utgöra ett mått på, måste hänsyn till det påvisade förhållandet alltid tagas.
2. $CaCO_3$ transporten ökar alltid med vattenföringen.

3. Mer än 50% av årstransporten $CaCO_3$ vid utloppet "Tunel" äger rum under snösmältningsperioden (mars-maj) på våren då infiltrationen är stor och korrosionen i vattnets vertikala cirkulationszon är intensiv. Under resten av året varierar transporten med vattenföring och nederbörd.
4. På grund av bristen på data har det varit omöjligt att beräkna den reella denudationshastigheten för karstområdet mellan sluk och utlopp. Det kan emellertid konstateras att resultatet av en sådan beräkning torde understiga 50 mm/1000 år. Beräkningar utförda på grundval av Corbels metodik kan vara missledande och ge högst varierande resultat från mätning till mätning inom ett och samma karstområde.

VIII KLIMATETS BETYDELSE FÖR KARSTLANDSKAPETS UTVECKLING. SAMMANFATTANDE DISKUSSION.

På grundval av de erhållna resultaten från undersökningarna i Artfjället, Tjeckoslovakien och på Västspetsbergen kan man svårligen draga några bestämda slutsatser angående klimatets betydelse för karstlandskapets utveckling. De morfometriska analysresultaten från Artfjällets karstlandskap, vilket kan klassificeras som glaciononival bergskarst enligt Sweetings (1972) klassificering, ger emellertid klara besked om att karst i en arktisk miljö inte alltid uppvisar en sådan brist på ytkarstfenomen som antytts av bl.a. Corbel (1957, 1960), Bögli (1960) och Sweeting (1972). De kemiska analysresultaten från de tre undersökningsområdena tyder på att temperaturfaktorns betydelse för förkarstningsintensiteten är av underordnad betydelse i jämförelse med rådande nederbörds- och avrinningsförhållanden.

VIII 1. FÖRKARSTNINGSINTENSITETEN

De låga kalciumhalterna i vattnet på Artfjället är i första hand beroende på relativt höga subterrana cirkulationshastigheter orsakade av den stora höjdskillnaden mellan sluk och källor medan de högre kalciumhalterna för Västspetsbergens undersökningsområde och Moravský Kras är orsakade av lägre cirkulationshastigheter som en följd av områdenas fysiografiska förhållanden. Skillnaderna mellan de tre områdena i förkarstningsintensitet (denudationshastighet) är som nämnts i första hand beroende av rådande nederbörds- och avrinningsförhållanden. Således är denudationshastigheten på Västspetsbergen, trots de relativt höga kalciumhalterna, låg på grund av låg årsmedelnederbörd i jämförelse med Artfjället och Moravský Kras. Gemensamt för de tre områdena är, förutom de påvisade förhållandena mellan hårdhet och vattenföring, en maximal korrosion under vårens snösmältning då också huvuddelen av årets kemiska transport äger rum. De erhållna skillnaderna i de recenta kemiska processernas intensitet kan inte ligga till grund för en klassificering av karst i arktisk-, subarktisk- och tempererad karst. Först för områden med likartade nederbörds- och avrinningsförhållanden kan en sådan klimatmorfologisk klassificering ske varvid faktorer som temperatur, vegetation och jordtäcke blir utslagsgivande förutsatt att berggrundens uppbyggnad är likartad.

VIII 2. MORFOLOGISKA SKILLNADER

Karstmorfologiskt skiljer sig de tre undersökningsområdena väsentligt från varandra dels på grund av skillnader i de kemiska processernas intensitet och dels på grund av skillnader i geologisk utveckling. Undersökningsområdet på Västspetsbergen saknar helt karstkarakteristika, bortsett från en del mikrokarren, som en följd av permafrost, intensiv frostvittring och låg denudationsintensitet. Permafrosten tillsammans med dräneringsområdets brist på relief och närhet till erosionsbasen verkar hämmande på utbildandet av subterran dränering vilken är en förutsättning för att ett karstlandskap skall kunna utvecklas medan frostvittringen verkar destruktivt på alla karrenfenomenen. Existensen av subterrant utbildad karst på Västspetsbergen har emellertid kunnat påvisas av bl.a. Orvin (1944) och Baranowski (1973). I de av dessa relaterade fallen torde den underjordiska dräneringen vara beroende av subglacialt smältvatten samtidigt som berggrundstopografi- och destruktion starkt skiljer sig från det ovan beskrivna fallet. Man kan emellertid konstatera att förutsättningarna för utbildandet av karst i en högarktisk (permafrost-) miljö är ogynnsamma.

Artfjällets glacio-nivala bergskarst skiljer sig starkt till karaktären från Moravský Kras vilket kan klassificeras som fluviokarst av låglandstyp beläget i en tempererad klimatmiljö. Karstutvecklingen i Moravský Kras har som tidigare nämnts kunnat härledas ända tillbaka till lägre krita varför landskapet är ett resultat inte bara av nuvarande karstprocessers verkan utan också av skeenden under gångna geologiska perioder. Då området, till skillnad från Artfjället och Västspetsbergen, inte varit utsatt för någon nedisning under pleistocen bär det fortfarande vittnesbörd om de gångna utvecklingsfaserna. Dess morfologi, recenta och fossila dräneringssystem kan således på grund av den polygenetiska karaktären inte sägas vara specifik för en viss klimattyp. De skillnader som kan konstateras med avseende på morfologi och hydrologi, i jämförelse med Artfjällets karstområde är, som i viss mån framgår av klassificeringen, i hög grad beroende på skillnader i geologisk struktur. Närvaron av vegetations- och jordtäcke, vilkas existens givetvis är klimatbetingade, utgör stimulerande faktorer för förkarstningen. Dessa är av mindre betydelse eller saknas helt inom arktiska och subarktiska områden.

Morfologin i Artfjällets karstområde är, liksom det hydrologiska mönstret, i hög grad betingat av den senaste nedisningen. Den förhållandevis korta period under vilken förkarstning kunnat ske sedan den senaste nedisningen har givit som resultat karstformer av relativt små dimensioner. Depressionstätheten är emellertid stor och det underjordiska dräneringssystemet väl utvecklat på grund av förkarstningsvänlig berggrund och hög årsnederbörd. Frostvittringen utgör en väsentlig process vid utbildandet av karstdepressioner, framför allt instörtningsdoliner och snödoliner, men verkar samtidigt destruktivt på ytformer av små dimensioner såsom karren. Den korta tid under året som temperaturen överstiger 0° C verkar givetvis också hämmande på förkarstningen vilket är en bidragande orsak till landskapets relativa fattigdom på karrenfenomen.

VIII 3. SLUTSATSER

Sammanfattningsvis kan sägas att områden med likartad geologi och topografi för sin karstutveckling i första hand är beroende av nederbörds- och avrinningsförhållanden. Först i andra hand gör sig temperaturfaktorn samt typ och mängd av vegetations- och jordtäcke gällande. Hög temperatur och riklig vegetation inverkar positivt på både yt- och subterran förkarstning medan låg temperatur och brist på vegetations- och jordtäcke verkar hämmande på utbildandet av karst. De utförda undersökningarna ger inget belägg för att karstlandskap i arktisk eller subarktisk miljö i högre grad skulle kännetecknas av välutbildade subterrana dräneringssystem än karstlandskap i tempererad klimatmiljö. De ger heller inget belägg för att karstlandskap i arktisk miljö kännetecknas av brist på ytkarstfenomen utan snarare tvärt om. Förutsättningarna för utbildandet av karst i permafrostmiljö är emellertid mindre goda.

IX SUMMARY

The dissertation is a study of karst above all with respect to morphology, hydrology and chemical processes. The major part of the presented material is based on investigations carried out in a karst area on Artfjället during 1970-1972. Artfjället is situated in the Caledonian Mountain Range in southern Lapland (fig. 7). During the period 1970-1973 investigations have been made, apart from in the above mentioned area, in Czechoslovakia and West-Spitzbergen.

The chapters I-IV give a summing up presentation of the extent of the investigations, nomenclature, definitions and description of some karst characteristics. Futher on, different types of karst classifications and the chemical weathering processes in limestone are accounted for. A summary is given of the progress of karst research. Finally, a short survey of literature on Swedish karst research is presented.

In chapter V the karst area of Artfjället (fig. 9, 20) is described with respect to morphology, morphometry, hydrology and chemical processes. A summary presentation is made of the Sotsbäck Cave, the biggest known cavern in Sweden.

According to Köppen´s classification (Köppen 1936) the climate belongs to the type ET, tundra climate (tab. 2). However, it should be noted that no permafrost exists in this region.

The morphological units of the landscape were systematized and then processed morphometrically mainly according to the methods introduced by Williams (1969, 1971). The results indicate that the landscape has a high permeability in connection with a highly developed vadose underground drainage system. In the vicinity of the springs, however, marked groundwater horizons may appear. The landscape, although an arctic one, displays a large number of morphological units. The depression density is great ($57/km^2$) even if the size of the depressions is relatively small, which results in low R_p (index of pitting) values (for definitions see page 63). Different types of karren occur but they are fairly rare (tab. 3-8).

The water discharge at the greatest swallets (S_1 and S_2) and at the karst spring U_1 has been recorded during May-August and during one week in December 1971. During the snow melt at the end of May and beginning of June up to 60% of the outflow at U_1 may con-

sist of percolation water. This value decreases rapidly and at the beginning of August it is only a few per cent of the outflow (fig. 27).

In order to state the communication between different swallets and springs and to get an idea of the characteristic features of the underground drainage system tracing experiments were carried out with Rhodamin B. The experiments showed that S_1, S_2 and S_3 had communication with the karst spring U_1 (fig. 28).

Water samples were collected from different parts of the drainage area once or twice a day and analysed within an hour for total hardness, alkalinity and pH. It was found that the carbonate hardness, in mg $CaCO_3/l$, is inversely dependent on the water discharge. The relationship can be expressed by the function $y = ax^b$. Its graphic manifestation seems in the first place to be dependent on water temperature and the characteristics of the drainage system (fig. 31-33). This relationship must be employed when calculating the limestone solution intensity.

For calculating the chemical denudation Corbel´s formula (1959), slightly modified by Williams (1963) has been used. The denudation has also been calculated on the basis of water discharge measurements and the above mentioned relationship according to formula (2). It has been found that the major part of the chemical transport occurs during snow melt when the amount of percolation water in the subterranean drainage system is largest. The chemical denudation rate is relatively high (28 mm/1000 years) compared with results from other arctic areas and also compared with some other results from warmer latitudes (tab. 13-14). Further the analyses indicate that the water reaching the outlets is still aggressive (fig. 34).

The Sotsbäck Cave forms an intergral part of the subterranean drainage system in the research area (fig. 38-39). It has a mapped length of 1650 m and a vertical amplitude of 110 m between the entrance S_1 and the innermost part of the cave 520 m from the entrance. The distance between swallet S_1 and outlet U_1 is 2200 m horizontally and 250 m vertically. The cave consists of an upper dry system and an active lower system, which is drained by the brook that is swallowed at S_1. The abundance of erosive and accumulative forms is salient. Certain portions of the upper tunnel network are

filled with thick and well stratified sands.

Parts of the subterranean drainage system are supposed to be of subglacial origin. The main stage of the development of the Sotsbäck Cave is supposed to have taken place during the period for the withdrawal of the last inland ice from the area.

The results presented in chapter VI are based on corrosion analyses carried out at Isfjord Radio, West-Spitzbergen, in August 1972 (fig. 68). To obtain the overall lowering rate in mm/1000 years Corbel´s formula (1959) slightly modified by Williams (1963) has been used. The denudation rate has also been obtained by calculating the water discharge and the chemical masstransport using the obtained relationship between total hardness and water discharge. The result of the analyses was overall lowering rate of 11 mm/1000 years. This value has been compared with the results of Corbel (1957, 1959, 1960) from Spitzbergen and those presented by Smith (1969) from Somerset-Island (tab. 19).

The results in chapter VII are based on a number of corrosion analyses that were carried out in the northern part of Moravian Karst in Czechoslovakia (fig. 72). Water samples were taken at intervals of about 14 days at the swallets Holštejn and Ostrov and at the outlets "Tunel" and Malý výtok during the period February- May 1972 (fig. 73). Water temperature was measured at all places while water discharge was measured only at the outlets. The water samples were analysed for pH, total hardness and calcium hardness. It is quite obvious that the calcium hardness, expressed in terms of mg $CaCO_3$/l, is inversely dependent on the water discharge in the same way as has been shown for Artfjället and Spitzbergen. The relationship can be descibed by the function $y = ax^b$ where the factors a and b seem to be primarily dependent on the characteristics of the drainage system (fig. 74-75).

The $CaCO_3$ transport always increases with the water discharge and seems to be largest during the snow melt in spring (fig. 77, 80).

Consequently, on the basis of the results obtained one can state that calculations of the limestone solution intensity on the basis of Corbel´s formula tend to be misleading and can produce very different results from measurement to measurement within one and the same karst area depending on season and at which water discharge

the water samples were collected.

Chapter VIII contains a summary discussion about the significance of the climate to the karst landscape development starting from the research areas.

The results of the morphometric analyses from the karst area of Artfjället which can be classified as glacio-nival mountain karst according to Sweeting´s (1972) classification, give reliable information that karst in arctic environments is not always characterized by such a lack of surface karst phenomena as suggested by among others Corbel (1957, 1960), Bögli (1960) and Sweeting (1972). Nor do the investigations provide evidence that the karst landscape in arctic or subarctic environments should be characterized by well developed subterranean drainage systems in a higher degree than that in temperate climates. It is further stated that differences in morphology, hydrology and limestone solution intensity between the research areas can primarily, apart from different bedrock structures,be referred to differences in precipitation and run-off conditions.

X BILAGA 1-4

Bilaga 1. Tabell 1. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Utloppet U_1 9/5-16/5.
Förkortningar: tot.h. = totalhårdhet (total hardness), K.H. = karbonathårdhet (alkalinitet) (carbonate hardness), Q = vattenföring (water discharge), vt = vattentemperatur (water temperature), l.t. = lufttemperatur (air temperature), d^o = tyska hårdhetsgrader (german degrees), mekv/l = milliequivalents/l.

dat.	kl.	pH	tot.h.	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d^o	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C^o	C^o	l/s
9/5	07	7,8	1,30	1,10	3,640	66,8	1,91	65,0	55,0	+2,0	-	-
-"-	19	7,9	1,21	1,02	3,394	61,8	1,40	60,5	51,0	+1,6	+ 5	80
10/5	12	7,8	0,96	0,90	2,692	54,6	1,57	48,0	45,0	+1,6	+11	160
-"-	19	7,8	0,90	0,78	2,520	47,4	1,36	45,0	39,0	+1,3	+ 5	185
11/5	09	7,8	0,79	0,78	2,215	47,4	1,36	39,5	39,0	+1,3	+ 3	250
-"-	19	7,9	0,78	0,64	2,187	38,8	0,87	39,0	32,0	+0,9	+ 4	460
12/5	09	7,9	0,82	0,76	2,299	46,1	1,04	41,0	38,0	+0,9	+ 3	350
-"-	19	7,8	0,64	0,54	1,792	32,8	0,94	32,0	27,0	+0,5	+ 2	750
13/5	12	7,9	0,82	0,74	2,299	44,9	1,01	41,0	37,0	+0,5	+ 2	350
-"-	19	7,9	0,82	0,76	2,299	46,1	1,04	41,0	38,0	+0,5	- 1	375
14/5	12	8,0	0,88	0,78	2,464	47,2	0,86	44,0	39,0	+0,9	+ 5	249
-"-	22	8,0	0,90	0,78	2,520	47,2	0,86	45,0	39,0	+0,2	- 3	230
15/5	12	7,9	0,92	0,88	2,300	53,3	1,21	46,0	44,0	+0,9	+ 3	200
-"-	21	7,8	0,96	0,90	2,692	54,6	1,57	48,0	45,0	+0,5	± 0	185
16/5	12	8,0	0,96	0,88	2,692	53,3	1,21	48,0	44,0	+0,5	+ 3	170
-"-	19	7,9	0,96	0,90	2,692	54,6	1,23	48,0	45,0	+0,5	+ 2	180

Bilaga 1. Tabell 1. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Utloppet U_1 17/5-19/5, 4/6-16/6.

dat.	kl	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
17/5	11	7,9	0,98	0,84	2,744	50,9	1,15	49,0	42,0	+0,5	+ 2	180
-"-	19	7,8	1,04	0,90	2,912	54,6	1,57	52,0	45,0	+0,5	+ 1	180
18/5	11	7,8	1,04	0,92	2,912	55,8	1,60	52,0	46,0	+1,1	+ 7	130
-"-	19	7,8	1,04	0,90	2,912	54,6	1,57	52,0	45,0	+1,1	+ 5	150
19/5	14	7,8	0,96	0,84	2,692	51,0	1,46	48,0	42,0	+0,9	+ 5	190
4/6	15	7,7	0,56	0,44	1,568	26,7	0,97	28,0	22,0	+0,5	+ 7	1000
7/6	18	7,8	0,56	0,44	1,568	26,7	0,77	28,0	22,0	+0,7	+ 2	600
8/6	14	7,8	0,80	0,74	2,240	44,8	1,29	40,0	37,0	+0,6	+ 6	180
9/6	19	7,8	0,94	0,76	2,632	46,1	1,32	47,0	38,0	+0,7	+ 4	215
10/6	19	7,8	0,96	0,80	2,692	48,6	1,39	48,0	40,0	+0,9	+11	285
11/6	13	7,9	0,90	0,78	2,520	47,3	1,07	45,0	39,0	+1,1	+14	290
13/6	14	8,0	0,70	0,66	1,960	39,9	0,73	35,0	33,0	+1,3	+11	305
14/6	13	7,8	0,66	0,74	1,848	44,9	1,29	33,0	37,0	+1,4	+ 8	285
-"-	18	7,5	0,64	0,54	1,792	32,9	1,88	32,0	27,0	+1,5	+10	450
15/6	13	7,4	0,64	0,54	1,792	32,9	2,38	32,0	27,0	+1,3	+ 7	465
-"-	18	7,6	0,64	0,52	1,792	31,6	1,45	32,0	26,0	+1,3	+ 4	650
16/6	13	7,6	0,66	0,56	1,848	34,1	1,56	33,0	28,0	+1,3	+13	400

Bilaga 1. Tabell 1. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Utloppet U_1 16/6-29/6.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
16/6	18	7,6	0,60	0,54	1,680	32,8	1,49	30,0	27,0	+1,6	+13	510
17/6	13	7,7	0,54	0,42	1,512	25,5	0,92	27,0	21,0	+1,7	+ 8	595
-"-	18	7,9	0,40	0,40	1,120	24,2	0,55	20,0	20,0	+1,5	+10	830
18/6	13	7,8	0,36	0,36	1,008	21,9	0,63	18,0	18,0	+1,5	+13	915
-"-	18	7,7	0,40	0,38	1,120	23,1	0,84	20,0	19,0	+2,6	+10	865
20/6	18	7,7	0,54	0,42	1,512	25,5	0,92	27,0	21,0	+0,5	+ 8	565
21/6	13	7,6	0,62	0,42	1,736	25,5	1,17	31,0	21,0	+5,0	+13	300
-"-	18	7,9	0,60	0,42	1,680	25,5	0,58	30,0	21,0	+1,0	+10	565
22/6	13	7,7	0,60	0,44	1,680	26,7	0,97	30,0	22,0	+5,3	+15	240
-"-	18	7,6	0,50	0,44	1,400	26,8	1,22	25,0	22,0	+5,7	+ 8	400
23/6	13	7,7	0,52	0,46	1,474	28,0	1,01	26,0	23,0	+6,0	+16	270
-"-	18	7,7	0,48	0,42	1,344	25,5	0,92	24,0	21,0	+5,7	+ 7	340
24/6	13	7,7	0,54	0,42	1,512	25,5	0,92	27,0	21,0	+5,2	+ 7	310
-"-	18	7,8	0,46	0,40	1,288	24,3	0,70	23,0	20,0	+5,2	+ 5	300
27/6	18	7,7	0,50	0,42	1,400	25,5	0,92	25,0	21,0	+7,6	+12	340
28/6	13	8,0	0,56	0,46	1,568	27,8	0,51	28,0	23,0	+6,9	+12	355
29/6	13	7,9	0,52	0,44	1,474	26,7	0,60	26,0	22,0	+7,5	+17	280

Bilaga 1. Tabell 1. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Utloppet U_1 30/6-26/7.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
30/6	13	7,8	0,58	0,52	1,624	31,6	0,91	29,0	26,0	+7,0	+12	270
1/7	13	7,9	0,56	0,52	1,568	31,5	0,70	28,0	26,0	+8,0	+19	270
2/7	13	8,0	0,60	0,64	1,680	38,7	0,70	30,0	32,0	+9,6	+16	200
5/7	13	8,0	0,52	0,48	1,456	29,1	0,53	26,0	24,0	+10,3	+24	300
6/7	13	8,0	0,50	0,44	1,400	26,6	0,48	25,0	22,0	+10,2	+ 8	330
7/7	13	7,8	0,60	0,50	1,680	30,4	0,87	30,0	25,0	+9,7	+11	175
8/7	13	8,0	0,70	0,60	1,960	36,3	0,66	35,0	30,0	+8,9	+ 9	160
9/7	13	7,5	0,54	0,56	1,512	34,1	1,95	27,0	28,0	+8,5	+ 8	175
12/7	13	7,9	0,64	0,64	1,792	38,8	0,88	32,0	32,0	+8,3	+ 5	200
13/7	13	8,0	0,64	0,60	1,792	36,3	0,66	32,0	30,0	+8,3	+11	185
14/7	13	7,9	0,70	0,68	1,960	41,2	0,93	35,0	34,0	+7,9	+11	140
15/7	13	7,7	0,76	0,64	2,128	38,9	1,41	38,0	32,0	+9,3	+11	125
19/7	13	8,0	0,78	0,62	2,184	37,5	0,68	39,0	31,0	+9,0	+ 9	90
20/7	13	7,8	0,78	0,62	2,184	37,7	1,21	39,0	31,0	+8,3	+ 5	80
21/7	13	8,0	0,82	0,76	2,296	46,0	0,84	41,0	38,0	+7,8	-	95
22/7	13	8,1	0,82	0,80	2,296	48,3	0,70	41,0	40,0	+8,0	+ 9	80
26/7	13	7,9	0,66	0,68	1,848	41,2	0,93	33,0	34,0	+9,3	+14	115

Bilaga 1. Tabell 1. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Utloppet U_1 27/7-12/8, 23/8-26/8.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
27/7	13	8,1	0,74	0,72	2,072	43,5	0,70	37,0	36,0	+8,9	+13	110
28/7	13	8,1	0,78	0,75	2,184	45,3	0,65	39,0	37,0	+8,5	+16	75
29/7	13	8,1	0,80	0,70	2,240	42,3	0,61	40,0	35,0	+9,3	+18	65
2/8	13	7,9	0,78	0,78	2,184	47,3	1,07	39,0	39,0	+9,6	+11	70
3/8	13	8,1	0,78	0,80	2,184	48,3	0,70	39,0	40,0	+9,3	+13	70
4/8	13	8,0	0,78	0,82	2,184	49,6	0,90	39,0	41,0	+10,0	+19	65
5/8	13	8,2	0,80	0,72	2,240	43,4	0,54	40,0	36,0	+9,5	+18	70
6/8	13	8,1	0,76	0,70	2,128	42,3	0,61	38,0	35,0	+10,0	+21	65
9/8	13	8,0	0,86	0,80	2,408	48,4	0,88	43,0	40,0	+8,2	+13	60
10/8	13	8,2	0,90	0,82	2,520	49,5	0,63	45,0	41,0	+7,7	+10	50
11/8	13	8,2	0,80	0,78	2,240	47,1	0,60	40,0	39,0	+7,7	+11	50
12/8	13	8,1	0,84	0,86	2,352	51,9	0,75	42,0	43,0	+7,5	+12	50
23/8	13	8,2	0,92	0,88	2,576	53,1	0,60	46,0	44,0	+7,5	+17	70
24/8	13	8,2	0,92	0,78	2,576	47,0	0,53	46,0	39,0	+6,4	+ 8	85
25/8	13	8,3	0,96	0,80	2,688	48,0	0,44	48,0	40,0	+6,4	+11	70
26/8	13	8,2	0,82	0,74	2,296	44,6	0,51	41,0	37,0	+7,7	+12	85

Bilaga 1. Tabell 2. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_1 4/6-18/6.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
4/6	15	7,3	0,32	0,20	0,896	12,2	1,11	16,0	10,0	-0,1	-	-
7/6	18	7,5	0,32	0,32	0,896	19,5	1,22	16,0	16,0	-0,1	+ 2	110
8/6	14	7,4	0,40	0,36	1,120	21,9	1,58	20,0	18,0	+0,1	± 0	75
9/6	19	7,4	0,42	0,34	1,176	20,7	1,50	21,0	17,0	±0	+ 1	60
10/6	19	7,4	0,46	0,32	1,288	19,5	1,41	23,0	16,0	+1,7	+ 7	70
11/6	13	7,2	0,38	0,30	1,064	18,3	2,10	19,0	15,0	+3,5	+11	80
13/6	14	7,3	0,34	0,24	0,952	14,6	1,33	17,0	12,0	+2,4	+10	147
14/6	13	7,3	0,34	0,28	0,952	17,1	1,55	17,0	14,0	+2,1	+ 8	114
-"-	18	7,0	0,36	0,28	1,008	17,1	3,11	18,0	14,0	+3,0	+10	114
15/6	13	7,4	0,38	0,32	1,064	19,5	1,41	19,0	16,0	+2,4	+ 4	95
-"-	18	7,4	0,34	0,22	0,952	13,4	0,97	17,0	11,0	+1,9	+ 2	140
16/6	13	7,1	0,34	0,26	0,952	15,9	2,28	17,0	13,0	+3,5	+11	114
-"-	18	7,3	0,34	0,24	0,952	14,6	1,34	17,0	12,0	+3,8	+10	130
17/6	13	7,3	0,36	0,22	1,008	13,4	1,22	18,0	11,0	+2,0	+10	145
-"-	18	7,1	0,32	0,20	0,896	12,2	1,76	16,0	10,0	+1,7	+ 5	129
18/6	13	7,0	0,28	0,16	0,784	9,8	1,78	14,0	8,0	+2,1	+ 8	250

Bilaga 1. Tabell 2. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_1 18/6-5/7.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
18/6	18	7,1	0,30	0,14	0,840	8,5	1,22	15,0	7,0	+3,1	+ 6	280
20/6	18	7,4	0,28	0,26	0,784	15,8	1,14	14,0	13,0	+4,8	+15	129
21/6	13	7,4	0,32	0,28	0,896	17,1	1,23	16,0	14,0	+4,8	+13	126
-"-	18	7,3	0,32	0,36	0,896	21,9	1,99	16,0	18,0	+8,8	+10	138
22/6	13	7,3	0,28	0,30	0,784	18,3	1,66	14,0	15,0	+6,1	+13	126
-"-	18	7,2	0,28	0,26	0,784	15,8	1,82	14,0	13,0	+5,9	+ 6	245
23/6	13	7,2	0,32	0,32	0,896	19,5	2,24	16,0	16,0	+5,1	+11	160
-"-	18	7,2	0,36	0,24	1,008	14,6	1,68	18,0	12,0	+5,7	+ 5	177
24/6	13	7,3	0,28	0,20	0,784	12,2	1,11	14,0	10,0	+4,4	+ 4	162
-"-	18	7,2	0,34	0,24	0,952	14,6	1,68	17,0	12,0	+4,2	+ 3	147
27/6	18	7,4	0,30	0,20	0,840	12,2	0,88	15,0	10,0	+8,4	+10	300
28/6	13	7,6	0,42	0,34	1,176	20,7	0,95	21,0	17,0	+5,6	+11	170
29/6	13	7,5	0,38	0,34	1,064	20,7	1,19	19,0	17,0	+7,9	+12	190
30/6	13	7,6	0,38	0,34	1,064	20,7	0,95	19,0	17,0	+7,5	+ 8	180
1/7	13	7,5	0,40	0,38	1,120	23,1	1,33	20,0	19,0	+8,9	+17	117
2/7	13	7,5	0,42	0,36	1,176	21,9	1,26	21,0	18,0	+9,0	+12	125
5/7	13	7,6	0,36	0,36	1,008	21,9	1,00	18,0	18,0	+9,9	+21	140

Bilaga 1. Tabell 2. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_1 6/7-29/7.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
6/7	13	7,7	0,34	0,32	0,952	19,5	0,70	17,0	16,0	+9,3	+ 8	140
7/7	13	7,6	0,36	0,32	1,008	19,5	0,89	18,0	16,0	+9,4	+10	117
8/7	13	7,7	0,40	0,40	1,120	24,3	0,44	20,0	20,0	+7,9	+10	85
9/7	13	7,4	0,30	0,38	0,840	23,1	1,67	15,0	19,0	+8,9	+10	120
12/7	13	7,7	0,44	0,26	1,232	15,8	0,57	22,0	13,0	+9,2	+10	140
13/7	13	7,7	0,40	0,36	1,120	21,9	0,79	20,0	18,0	+9,2	+11	99
14/7	13	7,7	0,38	0,32	1,064	19,5	0,70	19,0	16,0	+9,7	+10	94
15/7	13	7,5	0,40	0,40	1,120	24,3	1,40	20,0	20,0	+8,8	+ 8	64
19/7	13	7,7	0,42	0,38	1,176	23,1	0,84	21,0	19,0	+8,9	+10	66
20/7	13	7,5	0,40	0,36	1,120	21,9	1,26	20,0	18,0	+5,9	+13	80
21/7	13	7,7	0,42	0,42	1,176	25,5	0,92	21,0	21,0	+10,2	-	52
22/7	13	7,8	0,42	0,42	1,176	25,5	0,72	21,0	21,0	+10,5	-	56
26/7	13	7,7	0,44	0,44	1,232	26,7	0,97	22,0	22,0	+12,8	-	55
27/7	13	7,8	0,40	0,36	1,120	21,9	0,63	20,0	18,0	+13,8	-	75
28/7	13	7,7	0,50	0,46	1,400	28,0	1,01	25,0	23,0	+14,7	-	50
29/7	13	7,8	0,48	0,50	1,344	35,4	0,98	24,0	25,0	+16,6	-	40

Bilaga 1. Tabell 2. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_1 2/8-12/8, 23/8-26/8.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
2/8	13	7,7	0,46	0,42	1,288	25,5	1,03	23,0	21,0	+16,8	+ 9,0	54
3/8	13	7,7	0,48	0,40	1,344	24,3	0,98	24,0	20,0	+15,7	+12,0	55
4/8	13	7,8	0,46	0,40	1,288	24,3	0,78	23,0	20,0	+18,6	+15,5	49
5/8	13	7,8	0,46	0,42	1,288	25,5	0,82	23,0	21,0	+16,2	+12,0	53
6/8	13	7,7	0,48	0,44	1,344	26,7	0,97	24,0	22,0	+19,1	+16,5	52
9/8	13	7,8	0,48	0,44	1,344	26,7	0,86	24,0	22,0	+11,3	+ 7,0	45
10/8	13	7,8	0,52	0,44	1,456	26,7	0,77	26,0	22,0	+10,9	+ 6,0	47
11/8	13	7,8	0,48	0,54	1,344	32,8	0,94	24,0	27,0	+ 9,8	+ 6,0	32
12/8	13	7,8	0,50	0,60	1,400	36,4	1,17	25,0	30,0	+13,0	+11,0	30
23/8	13	7,8	0,54	0,54	1,512	32,8	0,94	27,0	27,0	+11,3	+16,5	30
24/8	13	7,9	0,54	0,46	1,512	27,9	0,63	27,0	23,0	+ 9,6	+ 8,0	46
25/8	13	8,0	0,58	0,50	1,624	30,3	0,55	29,0	25,0	+10,5	+ 8,5	35
26/8	13	7,9	0,54	0,48	1,512	29,1	0,66	27,0	24,0	+11,5	+11,0	39

Bilaga 1. Tabell 3. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_2 14/6-29/6.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
14/6	18	6,9	0,46	0,24	1,288	14,6	3,34	23,0	12,0	+0,5	+10	43
15/6	13	6,8	0,40	0,24	1,120	14,6	4,20	20,0	12,0	+0,2	+ 6	43
-"-	18	7,2	0,36	0,20	1,008	12,2	1,40	18,0	10,0	+0,2	+ 4	50
16/6	13	7,1	0,40	0,24	1,120	14,6	2,11	20,0	12,0	+2,2	+12	40
-"-	18	7,2	0,40	0,26	1,120	15,8	1,82	20,0	13,0	+0,7	+ 8	41
17/6	13	7,3	0,30	0,22	0,840	13,4	1,22	15,0	11,0	+1,1	+ 5	101
-"-	18	7,2	0,28	0,16	0,788	9,8	1,12	14,0	8,0	+1,1	+ 8	126
18/6	13	7,0	0,26	0,14	0,728	8,5	1,55	13,0	7,0	+2,4	+ 8	149
21/6	13	7,3	0,30	0,26	0,840	15,8	1,44	15,0	13,0	+3,3	+14	41
-"-	18	7,4	0,36	0,38	1,008	23,1	1,67	18,0	19,0	+2,1	+10	30
22/6	13	7,3	0,32	0,24	0,896	14,6	1,33	16,0	12,0	+3,9	+13	52
-"-	18	7,1	0,28	0,18	0,788	11,0	1,58	14,0	9,0	+3,7	+ 8	68
23/6	13	7,3	0,32	0,26	0,896	15,8	1,44	16,0	13,0	+5,4	+15	47
-"-	18	7,3	0,32	0,26	0,896	15,8	1,44	16,0	13,0	+4,0	+ 6	49
24/6	13	7,4	0,34	0,28	0,952	17,1	1,23	17,0	14,0	+3,6	+ 6	39
27/6	18	7,5	0,32	0,24	0,896	14,6	0,84	16,0	12,0	+5,3	+10	58
29/6	13	7,5	0,32	0,24	0,896	14,6	0,84	16,0	12,0	+7,1	+12	58

Bilaga 1. Tabell 3. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_2 30/6- 26/7.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
30/6	13	7,6	0,38	0,22	1,064	13,4	0,61	19,0	11,0	+5,5	-	-
1/7	13	7,6	0,40	0,24	1,120	14,6	0,67	20,0	12,0	+8,3	+16	40
2/7	13	7,6	0,36	0,20	1,008	12,2	0,56	18,0	10,0	+9,2	+18	32
5/7	13	7,4	0,28	0,22	0,784	13,4	0,97	14,0	11,0	+19,0	+21	54
6/7	13	7,6	0,34	0,32	0,952	19,5	0,89	17,0	16,0	+8,8	+ 6	33
7/7	13	7,7	0,32	0,22	0,896	13,4	0,48	16,0	11,0	+8,9	+ 9	50
8/7	13	7,6	0,40	0,26	1,120	15,8	0,80	20,0	13,0	+7,7	+ 8	30
9/7	13	7,1	0,38	0,22	1,064	13,4	1,93	19,0	11,0	+6,8	+ 5	43
12/7	13	7,7	0,38	0,22	1,064	13,4	0,48	19,0	11,0	+6,8	+ 1	40
13/7	13	7,7	0,44	0,34	1,232	20,7	0,75	22,0	17,0	+9,2	+ 5	26
14/7	13	7,7	0,50	0,38	1,400	23,1	0,84	25,0	19,0	+11,8	+ 5	25
15/7	13	7,6	0,50	0,42	1,400	25,5	1,17	25,0	21,0	+11,0	+ 7	18
19/7	13	7,7	0,54	0,48	1,512	29,2	1,06	27,0	24,0	+9,9	+ 3	13
20/7	13	7,7	0,66	0,48	1,848	29,2	1,06	33,0	24,0	+8,5	+ 3	15
21/7	13	7,9	0,54	0,46	1,512	27,9	0,71	27,0	23,0	+11,3	-	12
22/7	13	7,8	0,72	0,58	2,016	35,2	1,13	36,0	29,0	+9,2	+11	14
26/7	13	7,9	0,72	0,56	2,016	33,9	0,77	36,0	28,0	+11,0	+13	15

Bilaga 1. Tabell 3. Analysresultat från Artfjället sommaren 1971. Sluket S_2 27/7-10/8.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
27/7	13	7,9	0,62	0,58	1,736	35,2	0,79	31,0	29,0	+12,5	+12	18
28/7	13	7,9	0,62	0,58	1,736	35,2	0,79	31,0	29,0	+12,2	+11	13
29/7	13	7,9	0,64	0,60	1,792	36,4	0,82	32,0	30,0	+14,9	+11	12
2/8	13	7,6	0,60	0,56	1,680	34,1	1,56	30,0	28,0	+12,5	+ 9	13
3/8	13	8,0	0,60	0,56	1,680	33,9	0,62	30,0	28,0	+13,7	+12	13
4/8	13	8,0	0,62	0,58	1,736	35,1	0,64	31,0	29,0	+14,4	+16	10
5/8	13	7,9	0,62	0,58	1,736	35,2	0,80	31,0	29,0	+14,0	+12	14
6/8	13	8,0	0,64	0,60	1,792	36,3	0,66	32,0	30,0	+17,2	+17	12
9/8	13	7,9	0,74	0,68	2,072	41,2	0,93	37,0	34,0	+ 9,3	+ 7	7
10/8	13	8,0	0,74	0,70	2,072	42,4	0,77	37,0	35,0	+ 9,3	+ 6	7

Bilaga 2. Analysresultat från Artfjället december 1971. Utloppet U_1 3/12-9/12.

dat.	kl.	pH	tot.h	K.H.	tot.h	HCO_3^-	CO_2	tot.h	K.H.	v.t.	l.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d°	mg/l	mg/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	C°	C°	l/s
3/12	13	8,2	1,14	1,04	3,197	62,7	0,80	57,0	52,0	+2,3	- 7	50
4/12	13	8,3	1,12	1,04	3,140	62,5	0,63	56,0	52,0	+2,4	± 0	45
5/12	13	8,2	1,10	1,00	3,084	60,2	0,69	55,0	50,0	+4,0	+ 2	52
6/12	13	8,1	1,10	0,98	3,084	59,2	0,85	55,0	49,0	+2,4	+ 3	52
7/12	13	8,2	1,12	1,04	3,140	62,7	0,71	56,0	52,0	+2,3	- 3	60
8/12	13	8,2	1,12	1,00	3,140	60,3	0,77	56,0	50,0	+2,3	- 5	55
9/12	13	8,2	1,12	1,00	3,140	60,3	0,77	56,0	50,0	+2,3	- 4	55

Bilaga 3. Tabell 1. Analysresultat från Moravský Kras våren 1972. Utloppet "Tunel" 7/2-2/5.

dat.	kl.	pH	tot.h	Ca-h	tot.h	Mg-h	tot.h	Ca-h	Mg^{+2} i % av Ca^{+2}	v.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d^o	mekv/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	%	C^o	l/s
7/2	13	-	4,20	3,60	11,76	0,60	210,0	180,0	16,7	+6,2	198
8/2	13	7,6	4,00	3,30	11,20	0,70	200,0	165,0	21,2	+6,2	198
14/2	13	7,4	4,20	3,00	11,76	1,20	210,0	150,0	40,0	+5,0	1700
21/2	12	7,4	3,20	2,30	8,96	0,90	160,0	115,0	39,0	+3,0	2700
28/2	12	7,3	2,80	1,90	7,84	0,90	140,0	95,0	47,1	+4,1	2700
6/3	11	7,6	3,50	2,10	9,80	1,40	175,0	105,0	66,7	+4,2	1900
28/3	10	7,5	4,20	3,00	11,76	1,20	210,0	150,0	40,0	+5,4	420
17/4	12	6,7	2,80	2,00	7,84	0,80	140,0	100,0	39,9	+7,0	2100
2/5	11	7,0	3,20	2,30	8,96	0,90	160,0	115,0	39,0	+6,4	947

Värdet på pH har korrigerats för Mg^{+2} koncentrationerna efter Picknett (1972).

Förkortningar: tot.h = totalhårdhet (total hardness)
Ca-h = kalciumhårdhet (calcium hardness)
Mg-h = magnesiumhårdhet (magnesium hardness)
v.t. = vattentemperatur (water temperature)
Q = vattenföring (water discharge)

Bilaga 3. Tabell 2. Analysresultat från Moravský Kras våren 1972. Utloppet Malý výtok 7/2-2/5.

dat.	kl.	pH	tot.h	Ca-h	tot.h	Mg-h	tot.h	Ca-h	Mg^{+2} i % av Ca^{+2}	v.t.	Q
			mekv/l	mekv/l	d^o	mekv/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	%	C^o	l/s
7/2	13	-	5,40	4,80	15,14	0,60	270,0	240,0	12,5	+7,8	31
8/2	13	7,4	5,60	5,00	15,70	0,60	280,0	250,0	12,0	+7,9	31
14/2	13	7,2	6,47	5,00	18,14	1,47	323,5	250,0	29,4	+8,0	100
21/2	12	7,2	4,29	3,20	12,03	1,09	214,5	160,0	34,2	+5,2	452
28/2	12	7,3	3,80	2,80	10,66	1,00	190,0	140,0	35,8	+5,1	315
6/3	11	7,4	4,20	3,10	11,78	1,10	210,0	155,0	35,6	+5,4	240
28/3	10	7,2	5,60	4,60	15,70	1,00	280,0	230,0	21,8	+6,8	63
17/4	12	6,7	5,24	3,64	14,69	1,60	262,0	182,0	44,0	+7,2	246
2/5	11	6,6	4,80	4,20	13,46	0,60	240,0	210,0	14,3	+7,8	133

Bilaga 3. Tabell 3. Analysresultat från Moravský Kras våren 1972. Sluket i Ostrov 14/2-2/5.

dat.	kl.	pH	tot.h	Ca-h	tot.h	Mg-h	tot.h	Ca-h	Mg^{+2} i % av Ca^{+2}	v.t.
			mekv/l	mekv/l	d°	mekv/l	mg $CaCO_3$/l	mg $CaCO_3$/l	%	C°
14/2	13	7,4	3,00	1,80	8,41	1,20	150,0	90,0	66,7	± 0
21/2	12	7,2	3,71	2,60	10,40	1,11	185,5	130,0	42,7	+4,1
28/2	12	7,2	3,40	2,20	9,53	1,20	170,0	110,0	54,5	+5,1
6/3	11	7,3	3,50	2,00	9,81	1,50	175,0	100,0	74,8	+3,4
28/3	10	torrlagt -		-	-	-	-	-	-	-
17/4	12	6,8	2,90	1,70	8,13	1,20	145,0	85,0	70,5	+6,4
2/5	11	7,0	3,24	2,24	9,10	1,00	162,0	112,0	44,7	+11,0

Sluket Holštejn 7/2-2/5.

7/2	13	-	2,71	1,61	7,60	1,10	135,5	80,5	68,8	+0,2
8/2	13	7,3	2,91	1,61	8,16	1,30	145,5	80,5	81,0	+0,4
14/2	13	7,3	3,60	2,00	10,09	1,60	180,0	100,0	71,1	+0,1
21/2	12	7,2	2,70	1,70	7,57	1,00	135,0	85,0	58,9	+1,7
28/2	12	7,1	2,60	1,90	7,29	0,70	130,0	95,0	36,7	+3,8
6/3	11	7,2	2,80	2,00	7,85	0,80	140,0	100,0	39,8	+3,2
28/3	10	7,2	2,61	1,61	7,32	1,00	130,5	80,5	62,5	+5,4
17/4	12	6,6	2,60	1,50	7,29	1,10	130,0	75,0	73,4	+7,5
2/5	11	6,8	2,60	2,00	7,29	0,60	130,0	100,0	30,0	+12,0

Bilaga 4. Ordlista

En sammanställning över några av de vanligast förekommande karstuttrycken, vilka är mindre vanliga i den allmänna morfologiska litteraturen.

Accelererad korrosion: kallas den korrosion som i intensitet överstiger omgivningens.
Aggressivt vatten: kallas det vatten som till följd av överskott på fri CO_2 kan lösa kalciumkarbonat. Sådant vatten benämnes också omättat vatten till skillnad från mättat vatten, vilket senare uppnått jämvikt i förhållandet mellan löst och icke löst mängd kalciumkarbonat.
Alloktont vatten: det vatten som når ett karstområde och har sin källa i den icke karbonathaltiga berggrund som omger karstområdet.
Alkalinitet: se karbonathårdhet
Avkylningskorrosion: ökad aggressivitet hos karstvatten (mättat eller omättat) som en följd av temperatursänkning varvid fri CO_2 frigöres.
Blandningskorrosion (Mixed corrosion, Mischungskorrosion): ökad aggressivitet hos karstvatten som en följd av att mättade vatten med olika kalciumkoncentrationer blandas varvid fri CO_2 frigöres.
Cockpit karst (Kegelkarst, Cone karst): en tropisk karsttyp bestående av oregelbundna depressioner (cockpits) och åtskiljande konliknande kullar (Cones, Kegeln) med brant stupande sidor. Regelbundet assymetriska kullar i ett tropiskt karstlandskap benämnes ibland mogotes.
Dolin: en sluten depression med en diameter som vanligen överstiger djupet. Den utbildas genom att sprickor i berggrunden vidgas genom korrosion med sättningar i markytan som följd. Dess botten är vanligen täckt med inspolat och nedrasat material. Då kalkstenen är täckt med ett jordlager kan korrosionen i underliggande sprickor ge upphov till att de lösa avlagringarna genom ras och glidningar transporteras ned i dessa varvid doliner med instabila sidor utbildas (alluvial dolin, drift dolin). Instörtningar av grottor eller delar av grottor ger upphov till instörtningsdoliner (collapse dolines) medan doliner som i hög grad är beroende av snö för sin utbildning kallas snödoliner eller kotlici. Sprickdoliner benämnes de doliner som utgöres av korrosion vidgade sprickor vilka leder atmosfäriskt vatten till det subterrana drä-

neringssystemet.

Droppsten: ett samlingsnamn för olika typer av kalciumkarbonatutfällningar i grottor. Droppstenarna är vanligen uppbyggda av kalcit (romboidisk kristallform) eller vilket är mindre vanligt av aragonit (ortoromboidisk ktistallform).

Exsurgence: en karstkälla vars vatten består av nederbörds- och smältvatten som via infiltration ingått i den subterrana cirkulationen.

Flytfasetter (scallops, Fliessfacetten): skålformade, ripplesliknande urholkningar i kalksten bildade av rinnande vatten.

Freatiskt vatten: grundvatten under hydrostatiskt tryck, vilket cirkulerar i den ständigt vattenmättade zonen. Det freatiska vattnet ger genom sin erosiva verkan upphov till freatiska gångar, vilka kännetecknas av cirkulära eller ellipsformade gångtvärsnitt.

Förkarstning, karstifiering (karstification): den kemiska lösningsprocess och infiltration vilken ger upphov till karstlandskapets karakteristiska ytmorfologi och underjordiska dräneringssystem. Med förkarstning i en vidare bemärkelse avses alla processer som medverkar till karstlandskapets tillblivelse. Ett landskap som kännetecknas av karst kan sägas vara karstifierat.

Helectit: droppsten bildad av framsipprande hydrostatiskt vatten vilket ger den en exentrisk och oregelbunden form. Den växer utan inverkan av gravitationskraften.

Icke-alkalin hårdhet: uttrycker koncentrationen av andra kalcium- och magnesiumsalter än vätekarbonaterna och anges vanligen i p.p.m. $CaCO_3$, mg $CaCO_3$/l eller mekv/l.

Intermittent källa: en källa som avger vatten med regelbundna eller oregelbundna tidsintervaller som en följd av sifoner och oregelbundna passager innanför själva källan (pulserande källa). De källor som klassificerats som intermittenta på Artfjället är inte av den pulserande typen utan avger vatten bara under snösmältningen eller då grundvattentillgången annars är tillräcklig.

Kalciumhårdhet: ett uttryck för koncentrationen lösta kalciumsalter. Den anges vanligen i mg Ca^{+2}/l, tyska hårdhetsgrader (d^o), mekv/l, p.p.m. $CaCO_3$ eller mg $CaCO_3$/l.

Karbonathårdhet, alkalin hårdhet, alkalinitet: i samband med vatten i karstområden avses koncentrationen av kalcium- och magnesiumvätekarbonat (HCO_3^-) uttryckt i p.p.m. $CaCO_3$, mg $CaCO_3$/l eller mekv/l.

Karren: ett samlingsnamn för depressioner, håligheter och fåror av små dimensioner utbildade genom korrosion i kalksten.
Karst: ett sammanfattande begrepp som står för de landskapsformer och det speciella dräneringsmönster som kan utbildas, huvudsakligen genom korrosion, i karbonathaltig berggrund.
Karstdepressioner: ett samlingsnamn för alla depressioner av stora dimensioner i ett karstlandskap. Depressionerna indelas i olika typer av poljes och doliner.
Karstvatten: kallas allt cirkulerande vatten inom ett karstområde. Det karakteriseras framför allt av relativt höga kalciumhalter.
Magnesiumhårdhet: uttrycker koncentrationen av i vatten lösta magnesiumsalter och anges vanligen i mg Mg^{+2}/l, p.p.m. $MgCO_3$, p.p.m. $CaCO_3$, mg $MgCO_3/l$ eller $CaCO_3/l$ eller mekv/l.
Polje: en depression i kalksten vars longitudinella axel vanligen är parallell med tektoniska riktningselement i landskapet och kan nå en längd överstigande 20 km. Poljen kan vara öppen eller sluten beroende på om den dräneras av ytvattenflöden eller subterrant.
Ponor: ett sluk vilket vanligen utgör ingången till ett grottsystem. (Se sluk).
Resurgence: en karstkälla vars vatten utgöres av ett tidigare slukat ytvattendrag.
Sluk, slukhål, (swallet, swallow hole, stream sink): hål eller sprickor i berggrunden i vilka ytvattendrag helt eller delvis försvinner underjordiskt. Cvijić (1924) använde sig av termen ponor för samma fenomen. Beroende på slukens utseende och genes benämnes de lösningssluk, instörtningssluk och sprickssluk.

Speleologi: läran om grottors natur, genes och biologiska liv.
Stalagtit: en typ av droppsten vilken bildas i taket på grottor av droppande vatten genom utfällning av kalciumkarbonat vanligen i form av kalcit.
Stalagmit: en droppstensform vilken växer från golvet och uppåt och bildas av från taket eller en stalagtit droppande vatten genom utfällning av kalciumkarbonat.
Uvala: en depression bildad genom att en eller flera doliner vuxit samman.
Vadöst vatten: den del av grundvattnet i ett karstlandskap som rinner fritt i enlighet med gravitationskrafterna och cirkulerar

i den vadösa zonen, dvs. i zonen ovanför den ständigt vattenmättade zonen (freatiska zonen). Grottor och gångar vars morfologi är starkt influerade av vadöst vattens erosiva verkan benämnes vadösa grottor respektive vadösa gångar.

XI LITTERATURREFERENSER

Alonso, M., Finn, E.J. 1972. "Fundamental University Physics. Part I, Mechanics". Addison Wesley Publ. Comp. 271-275.

Andersson, N., Gusting, M. 1962. "Hydrogeologisk undersökning av Lummelundaströmmen". Examensarbete vid Inst. för Geol. vid C.T.H. Göteborg.

Balázs, D. 1972. "Comparative morphogenetical study of karst regions in the tropical and temperate zones". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain. Vol. 14, No 2, sid. 54.

Baranowski, S. 1973. Muntligt meddelande.

Bauer, F. 1964. "Kalkabtragungsmessungen in den Österreichischen Kalkhochalpen". Erdkunde 18, 95-102.

Beckinsale, R.P. 1972. "The limestone bugaboo: surface lowering or denudation or amount of solution?" Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain. Vol 14, No 2, 55-58.

Beskow, G. 1929. "Södra Storfjället im südlichen Lappland". S.G.U. Ser. C,nr 350.

Birot, P. 1954. "Problèmes de morphologie karstique". Annales Géogr., 63, 160-192.

Bretz, J.H. 1938. "Caves in the Galena formation". J. Geol. 46, 828-841.

— 1942. "Vadose and phreatic features of limestone caverns". J. Geol. 50, 675-811.

— 1956. "Caves of Missouri". Miss. Geol. Surv. and Water Resources, Ser. 2, No 39.

Büdel, J. 1951. "Fossiler Tropenkarst in dem Scwäbischen Alb und den Ostalpen". Erdkunde 5, 168-170.

— 1973. "Reliefgenerationen der Poljenbildung im Dinarischen Raum". i "Neue Ergebnise der Karstforschung in den Tropen und im Mittelmeerraum" utgiven av A.Semmel och sammanställd av K-H. Pfeffer. Geogr. Z. Heft 32, 134-141.

Bögli, A. 1956. "Der Chemismus der Lösungsprozesse und der Einfluss der Gesteinsbeschaffenheit auf die Entwicklung des Karstes". i "Report of the commission on karst phenomena" av H. Lehmann. I.G.U. 18th Int. Geogr. Congr, Rio de Janeiro, August 9-18, 1956. 7-17.

— 1960. "Kalklösung und Karrenbildung". Z. Geomorph. Suppl. 2, 4-21.

— 1964. "Mischungskorrosion-ein Beitrag zur Verkastungsproblem". Erdkunde 18, 83-92.

— 1965 a. "The role of corrosion by mixed water in cave forming" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf., Brno 1964" av O. Štelcl 123-132.

— 1965 b. "Scientific research in the Hölloch, the longest cave of the world" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf., Brno 1964" av O. Štelcl, 201-208.

— 1966. "Karstwasserfläche und unterirdische Karstniveaus". Erdkunde 20, 11-19.

— 1969. "Probleme unterirdischer Verkastung". Studia Geogr. 5, Brno, 57-70.

— 1970. "Das Hölloch und sein Karst". Suppl. 4 à "STALACTITE", 109 sidor.

— 1971. "Corrosion by mixing of karst waters". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 13, No 2, 109-113.

— 1973. "Studie zur Hydrografie der Poljen" i "Neue Ergebnisse derKarstforschung in den Tropen und im Mittelmeerraum" utgiven av A. Semmel och sammanställd av K-H. Pfeffer. Geogr. Z. Heft 32, 84-87.

Cave Research Foundation. 1973. "The Flint Mammoth Cave System" Mammoth Cave National Park, Kentucky, USA. Karta.

Chlupáč, I. 1966. "Paleozoic in Moravia" i "Regional Geology of Czechoslovakia, part I" av J. Svoboda. 367-378.

Corbel, J. 1952. "Les phénomènes karstique en Suède". Geogr. Annaler 34, Häfte 3-4, 203-237.

— 1957. "Les Karst du Nord-Ouest de l´Europe". Mém. Institut Études Rhodaniennes de l´Université de Lyon. Nr 12. 544 sid.

— 1959. "Vitesse de lérosion". Z. Geomorph. N.F. 3, 1-28.

— 1960. "Nouvelles reserches sur les karsts arctique Scandinaves". Z. Geomorph. Suppl., 2, 74-80.

Corbel, J., Stchouzkoy, T., Franck, J-C., Muxart, R. 1965. "Chemical erosion in the Moravian Karst" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf., Brno 1964" av O. Štelcl. 107-124.

Cramer, H. 1941. "Die Systematik der Karstdolinen". Neues Jb. Miner. Geol. Paläont., 85, 293-382.

Curl, R.L. 1964. "On the definition of a cave". Bull. Nat. Speleol. Soc. 26, No 1, 1-6.

— 1966. "Scallops and flutes" Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 7, No 2, 121-160.

— 1973. "Deducing flow velocity from scallops" i "Int. Speleol. 1973. Abstracts of papers" av V. Panoš, Palacký University, Olomouc. sid. 98.

Cvijić, J. 1893. "Das Karstphänomen" Geogr. Abh., 5, 217-329.

— 1924. "The evolution of lapiés. A study in karst physiography" Geogr. Rev., 14, 26-49.

Davies, R.E. 1963. "Flow markings" Cave Res. Grp. of Great Britain, Newsletter 87, 8-9.

Davis, W.M. 1930. "Origin of limestone caverns" Bull. geol. Soc. Am., 41, 475-628.

Douglas, I. 1968. "Some hydrologic factors in the de-

nudation of limestone terrains". Z. Geomorph., 12, 241-255.

Festin, E. 1922. "Fridlysning av Bjurälvens karstlandskap och återinplantering av bävern" Sveriges Natur XIII, 32-62.

Flood, B., Nagy, J., Winsnes, T.S. 1971. "Geological Map Svalbard" Norsk Polarinstitutt skrifter. Nr 154 A.

Ford, D.C. 1971. "Geologic Structure and a New Explanation of Limestone Cavern Genesis" Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 13, No 2, 81-94.

Ford, T.D. 1971. "Structures in Limestone Affecting the Initiation of Caves" Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 13, No 2, 65-71.

Freij, Y., Johansson, E., Tell, L. 1967. "Balsbergsgrottan" Ark. för sv. grottforskn. Nr 7.

Freij, Y., Lindén, A., Sjöberg, R. 1971. "Sveriges 20 längsta grottor 1970" Grottan. Org. för SSF. Nr 3, sid. 8.

Gams, I. 1965. "Types of accelerated corrosion" i "Problems of the Speleological Research. Proc. Int. Speleol. Conf., Brno 1964" av O. Štelcl. 133-139.

— 1969 a. "Some morphological characteristics of the Dinaric Karst". Geogr. J. 135, 563-572.

— 1969 b. "Ergebnisse der neueren Forschung der Korrosion in Slowenien /NW-Jugoslavia/". Studia Geogr. 5, Brno. 9-20.

— 1972. "Effect of runoff on corrosion intensity in the Northwest Dinaric Karst". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain. Vol. 14, No 2, 78-83.

— 1973. "Die zweiphasige quartärzeitliche Flächenbildung in den Poljen und Blindtälern des nordwestlichen Dinarischen Karstes" i "Neue Ergebnise der Karstforschung in den Tropen und im Mittelmeerraum" utg. av A. Semmel och sammanställd

av K-H. Pfeffer. Geogr. Z. Heft 32, 143-149.

Gardner, J.H. 1935. "Origin and development of limestone caverns". Geol. Soc. Am. Bull., 46, 1255-1274.

Gavrilović, D. 1969. "Kegelkarst-Elemente im Relief des Gebirges Beljanica, Jugoslavien". Studia Geogr. 5, Brno., 159-166.

Gavelin, A., Högbom, A.G. 1910. "Norra Sveriges issjöar". S.G.U. Ser. Ca, No 7, 1-112.

Gerstenhauer, A. 1960. "Der tropische Kegelkarst in Tabasco". Z. Geomorph. Suppl. 2. 22-48.

— 1973. "Klimaspezifische Merkmale und das Problem der Genese des Kegelkarstes" i "Neue Ergebnisse der Karstforschung in den Tropen und im Mittelmeerraum" utg. av A. Semmel och sammanställd av K-H. Pfeffer. Geogr. Z. Heft 32, 3-8.

Gilewska, S. 1964. "Fossil karst in Poland" Erdkunde 18, 124-135.

— 1965. "The evolution of karstphenomena in the southern part of the Silesian Upland" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf., Brno 1964" av O. Štelcl. 37-45.

Gislén, T., Brinck, P. 1948. "Subterrana vatten på Gotland med speciell hänsyn till Lummelundaströmmen". Lunds Univ. Årsskr. Avd. 2, Bd 44, Nr 4, 1-27.

Glennie, E.A. 1954. "The origin and development of cave systems in limestone". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain 3, 75-83.

— 1963. "Flow markings". Cave Res. Grp. of Great Britain. Newsletter 87, 8-9.

Goodchild, M.F., Ford, D.C. 1971. "Analyses of scallop patterns by simulation under controlled conditions". J. Geol. 79, 22-37.

Groom, G.E., Williams, W.H. 1965. "The solution of limestone in South Wales". Geogr. J., 131, 37-41.

Grund, A. 1903. "Die Karsthydrografie". Geogr.Abh.,7, No 3, 200 sidor.

— 1914. "Der geographische Zyklus im Karst". Z. Ges. Erdk. Berlin. 621-640.

Gvozdeckij, N.A. 1965. "Types of karst in the U.S.S.R.". i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf., Brno 1964" av O. Štelcl. 47-54.

— 1973. "On the priority in the discovery of the phenomena mixed solution" i "International Speleology 1973. Abstract of papers" av V. Panoš, Palacký University Olomouc. sid. 118.

Harmon, R.S., Hess,J.W., Jacobson, R.W., Shuster, E.T., Haygood, C., White, W.B. 1972. "Chemistry of carbonate denudation in North America". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain. Vol. 14, Nr 2, 96-103.

Hanström, B. 1947. "Balsbergsgrottan, Skånes största naturliga grottbildning". Natur i Skåne. Sveriges Natur. Stockholm. 112-118.

Helldén, U. 1973 a. "Some calculations of the denudation rate in a dolomitic limestone area at Isfjord Radio, West-Spitzbergen". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain. Vol. 15, No 2, 81-87.

— 1973 b. "Limestone solution intensity in a karst area in Lapland, northern Sweden" i "International Speleology 1973. Abstracts of papers" av V. Panoš, Palacký University, Olomouc. sid. 116.

— 1973 c. "Några korrosionsanalyser från ett kalksten-dolomitstråk på Spetsbergen". Lunds Univ. Naturgeogr. Inst. Rapporter och Notiser 15, 77-88.

— 1973 d. "Artfjället, Lapland, Sweden: Karst hydrology and morphometry". Lunds Univ. Naturgeogr. Inst. Rapporter och Notiser 20, 22 sidor.

— 1973 e. "Karst" Grottan. Org. för SSF.

Nr 3, 19-20.

— 1974 a. "The hydrology and morphology of a karst area in Swedish Lapland". Trans. British Cave Research Association. Vol. 1, Nr 1, 43-53.

— 1974 b. "Limestone solution intensity in a karst area in Lapland, northern Sweden" Geogr. Annaler (under tryckning).

Hellgren, L-G. 1969. "Geologisk och hydrogeologisk undersökning av ett karstområde vid fjället Lullihatjårro norr om Torne Träsk, Lappland". Examensarbete vid Inst. för Geol. C.T.H.

Hjulström, F. 1935. "Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris". Uppsala. Almqvist & Wiksell. 305-320.

Horn, G. 1935. "Über die Bildung von Karsthöhlen unter einem Gletscher". Norsk Geogr. Tidsskr. 5, 494-498.

— 1947. "Karsthuler i Nordland". Norges Geol. Unders. Nr 165, 77 sidor.

Hjorten, P.G. 1968. "Grotter och grotteforskning i Rana". Norges Geol. Unders. Småskrift nr 9. 40 sidor.

Jacobson, R.L., Langmuir, D. 1972. "An accurate method for calculating saturation levels of ground waters with respect to calcite and dolomite". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain. Vol. 14, No 2, 104-108.

Jakucs, L. 1973 a. "The role of climate in the quantitative and qualitative control of karstic corrosion" i "Symposium on karstmorphogenesis. I.G.U. European Regional Conference. Hungary 1973". 122-152.

— 1973 b. "Die rolle des Klimas in der quantitativen und qualitativen Regelung der Karstkorrosion". Peterm. Geogr. Mitt., 117, Quartalsh. 7-13.

Jennings, J.N. 1969. "Karst of the seasonally humid tropics in Australia". Studia Geogr., 5. Brno, 149-158.

— 1971. "Karst". An Introduction to Systematic Geomorphology. Vol. 7. The M.I.T. Press. 252 sidor.

— 1972. "The Blue Waterholes, Cooleman Plain, N.S.W. and the problem of karst denudation rate determination". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain. Vol. 14, No 2, 109-117.

Karlgren, L. 1962. "Vattenkemiska analysmetoder". Komp. fr. Limn. Inst. Uppsala.

Katzer, F. 1909. "Karst und Karsthydrografie". Zur Kunde der Balkanhalbinsel, 8. Zarajevo.

Kayser, K. 1955. "Karstrandebene und Poljenboden. Zur Frage der Entstehung der Einebnungsflächen im Karst". Erdkunde 9, 60-64.

— 1973. "Bemerkungen über den Pluralismus der Poljenenstehung und die Stellung des Poljes im Rahmen des Karstformenschatzes" i"Neue Ergebnisse der Karstforschung in den Tropen und Mittelmeerraum" utg. av A. Semmel och sammanställd av K-H. Pfeffer. Geogr. Z. Heft 32, 75-82.

Knutsson, G. 1970. "Spårämnen som hjälpmedel vid grundvattenundersökningar" C.T.H. Inst. för vattenförsörjnings- och avloppsteknik. Publ. A 70:3, 47 sidor.

Knutsson, G., Carlsson, L., Nord, M. 1967. "Hydrogeological investigation of a karst area at Björkliden, Lappland, Sweden". C.T.H´s Förh. Nr 319, 229-259.

Kulling, O. 1955. "Beskrivning till berggrundskarta över Västerbottens län". S.G.U. Ser. Ca, No 37, del 2, 105-287.

Köppen, W. 1936. "Das geographische System der Klimate" 44 sidor i: Köppen-Geiger, "Handbuch der Klimatologie" Bd 1, teil C, Berlin.

Lehmann, H. 1936. "Morphologische Studien auf Java".

Geogr. Abh. III. Heft 9, 114 sidor.

— 1954. "Der tropische Kegelkarst auf den Grossen Antillen" Erdkunde 8, 130-139.

— 1956. "Der Einfluss des Klimas auf die Morphologische Entwicklung des Karstes". Report of the Commission on Karst Phenomena. I.G.U 18th Int. Geogr. Congr., Rio de Janeiro, August 9-18, 1956. 3-7.

— 1959. "Studien über Poljen in den venezianischen Voralpen und in Hochappenin". Erdkunde 13, 258-289.

Lehmann, H., Krömmelbein, K., Lötschert,W. 1956. "Karstmorphologische, geologische und botanische Studien in der Sierra de los Organos auf Cuba". Erdkunde 10, 185-204.

Lehmann, H., Roglič, J., Rathjens, C., Laserre, G., Harrassowitz, H., Corbel, J., Birot, P. 1954. "Das Karstphänomen in den verschiedenen Klimazonen" Erdkunde 8, 112-122.

Lehmann, O. 1932. "Die Hydrografie des Karstes". Leipzig und Wien. Franz Deuticke. 212 sidor.

Lindberg, K. 1952. "Notes sur quelques grottes de la Turquie". Ann. Spéléol. Tome 7, Fas 1, 55-66.

— 1954. "Notes sur quelques grottes de la Turquie". Ann. Spéléol. Tome 9, Fas 1, 1-9.

— 1956. "Grottes et spéléologie en Suède". Rass. Speleol. Ital., 8, Fas 3-4, 194-204.

— 1958. "Notes sur des Grottes de la Turquie d´Asie". Rass. Speleol. Ital., 10, Fas 1-2, 96-107.

— 1963. "Notes sur les grottes d´Afghanistan et apercu de leur faune". Actes de Deuxième Congr. Int. de Spéléol. Bari-Lecce-Salerno, 5-12 octobre 1958, 108-143.

Lois, H. 1956. "Die Entstehung der Poljen und ihre Stellung im Taurus". Erdkunde 10, 339-353.

Lundevall, C-F. 1965. "Karst phenomena in the Lummelunda area of Gotland" Geogr. Annaler 47 A, Nr 1,

45-60.

Malott, C.A. 1937. "Invasion theory of cavern development". Proc. Geol. Soc. Am. for 1937. sid. 323.

— 1939. "Karst valleys". Geol. Soc. Am. Bull. 50, sid. 1984.

Markowicz, M., Popov, V., Pulina, M. 1972. "Comments on karst denudation in Bulgaria". Geographia Polonica 23, 111-139.

Maurin, V., Zötl, J. 1966. "Ein fossiler semi-arider tropischer Karst auf Ithaka" Erdkunde 20, 204-208.

Maxson, J.H. 1940. "Fluting and facetting of rock fragments". J. Geol. 48, 717-751.

Merck, E. - "Die Untersuchung von Wasser. Eine Auswahl chemischer Methoden für die Praxis". 5 Auflage. E. Merck AG. Darmstadt.

Moneymaker, B.C. 1941. "Subriver solution cavities in the Tennessee Valley". J. Geol., 49, 74-86.

Newson, M.D. 1971. "The role of abrasion in cavern development". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 13. No 2, 101-107.

— 1972. "Merits of a hydrological bias to karst erosion studies". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 14, No 2, 118-124.

Nilsson, L. 1965. "Alvarkarst" Svensk Geogr. Årsb.,41, 73-85.

— 1968. "Karstfenomen på Ölands stora Alvar". Lic. avh. Naturgeogr. Inst. Lunds Universitet. Opubl. 163 sidor.

Olsson, G., Lundewall, C-F. 1966. "A newly discovered cave system at Lummelunda, Gotland". Geogr. Annaler 48 A, 51-54.

Orvin, Á.K. 1944. "Litt om kilder på Svalbard". Norges Svalbard- og Ishavsundersökelser 57, 24 sidor.

Oxaal, J. 1914. "Kalkstenshuler i Ranen". Norsk Geol. Unders. 69. 46 sidor.

— 1918. "Huler av Grönlitypen" Norsk Geol. tidskr. 5, 1-5.

Panoš, V. 1964. "Der Urkarst im Ostflugel der Böhmischen Masse". Z. Geomorph. N.F. 8, Heft 2, 105-162.

— 1965. "Genetic Features of a Specific Type of the Karst in the Central European Climate Morphogenetic Area", i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf. Brno 1964" av O. Štelcl. 11-23.

— 1969. "Introduction" i "Problems of the karst denudation". av O. Štelcl. Suppl. 5th Int. Speleol. Congr. Stuttgart 1969. Studia Geogr. 5, Brno, 5-7.

— 1972. "A brief analyses of problems in karst erosion studies". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 14, No 2, 49-51.

Panoš, V., Štelcl, O. 1968. "Physiografic and Geologic Control in Development of Cuban Mogotes". Z. Geomorph. N.F., 12, Heft 2, 117-165.

Picknett, R.G. 1972. "The pH of calcite solutions with and without magnesium carbonate present and the implications concerning rejuvenated aggressiveness". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 14, No 2, 141-150.

Quitt, E. 1965. "The main climate conditions in the Moravian Karst" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf. Brno 1964" av O. Štelcl. 167-174.

— 1971. "Climate regions of Czechoslovakia". Studia Geogr. 16, Brno. 21-30.

Rasmusson, G. 1953. "Karstfenomen vid Torne Träsk". Preliminärt medd. Svensk Geogr. Årsb., 29, 215-218.

— 1955. "Uppkomsten av ett gångsystem i Lulletjårrogrottan". Svensk Geogr. Årsb., 31, 65-72.

— 1957. "Formproblem i några karstgrottor inom Torneträskområdet". Lic. avh. Naturgeogr.

Inst. Lunds Universitet. Opubl. 224 sidor.

— 1970. "The upper cave at Björkliden. The Torneträsk region" Svensk Geogr. Årsb., 46, 127-137.

Raušer, J. 1965. "Biogeographic exploration of the Moravian Karst" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf. Brno 1964" av O. Štelcl. 149-161.

Raušer, J., Štelcl, O., Vlček, V. 1965. "Principal characteristics of karst water in the Central European Area according to the results of research from Moravian Karst" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf. Brno 1964" av O. Štelcl. 85-105.

Rhoades, R., Sinacori, M.N. 1941. "Pattern of ground water flow and solution". J. Geol. 49, 785-794.

Roglić, J. 1954. "Korrosive Ebenen im Dinarischem Karst" Erdkunde 8, 113-114.

— 1956. "Karst development and fluviatile erosion". Report of the Commission on Karst Phenomena. I.G.U. 18th Int. Geogr. Congr., Rio de Janeiro, August 9-18, 1956. 18-20.

— 1960. "Das Verhältnis der Flusserosion zum Karstprozess". Z. Geomorph. 4, Heft 2, 116-128.

— 1964. "Karst valleys in the Dinaric Karst". Erdkunde 18, 113-116.

— 1965. "The depth of the fissure cirkulation of water and the evolution of subterranean cavities in the Dinaric Karst" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf. Brno 1964" av O. Štelcl. 25-35.

— 1972. "Historical review of morphologic concepts" i "Karst. Important Karst Regions of the Northern Hemispere" av M. Herak och V.T. Stringfield. Elsevier. Amsterdam-London-New York. Chp. I, 1-18.

Roques, H. 1969. "A review of present-day problems in the physical chemistry of carbonates in solution". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain, Vol. 11, No 3, 139-164.

Rönning, O.I. 1964. "Svalbard flora". Norsk Polarinstitutt Polarhandbok Nr 1.

Sanders, E.M. 1921. "The cycle of erosion in a karst region (after Cvijić)". Geogr. Rev., 11, 593-604.

Sawicki, L.R. 1909. "Ein Beitrag zum geographischen Zyklus im Karst". Geogr. Z., 15, 185-204, 259-281.

Sellers, W.D. 1965. "Physical Climatology". The University of Chicago Press. Chpt. 7.

Shaw, T.R. 1974. "A short history of speleology up to 1900". Trans. British Cave Research Association. Vol. 1, Nr 1, 1-13.

Sjöberg, R. 1970. "Övre Ältsvattenexpeditionen 1970". S.S.F. Komp.

— 1972. "Preliminär svensk grottbibliografi" S.S.F., 28 sidor.

Smith, D.I. 1965. "Some aspects of limestone solution in the Bristol region". Geogr. J., 131, 44-49.

— 1969. "The solutional erosion of limestone in an arctic morphogenetic region". Studia Geogr. 5, Brno, 99-109.

Smyk, B., Drzal, M. 1964. "Untersuchungen über den Einfluss von Mikroorganismen auf das Phänomen der Karstbildung". Erdkunde 18, 102-113.

Steffensen, E. 1969. "The climate and its recent variations at the norwegian arctic stations" Meteorologiske Annaler 5, Nr 8.

Štelcl, J., Štelcl, O. 1966. "The role played by petrography in the exploration of the Moravian Karst" i "Problems of the speleological research Part II. Proc. Int. Speleol. Conf. Brno 1964" av O. Štelcl. 83-97.

Štelcl, O. 1963. "Höhlenniveaus des „Suchý žleb" im

Mährischen Karst". Die Höhle 14, Heft 1, 1-10.

— 1972. "Solution intensity on various types of calcareous rocks in Czechoslovakia". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain Vol. 14, No 2, 174-175.

Štelcl, O., Vlček, V., Piše, J. 1969. "Limestone solution intensity in the Moravian Karst" Studia Geogr. 5, Brno. 71-86.

Stenner, R.D. 1969. "The measurement of the aggressiveness of water towards calcium carbonate". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain Vol. 11, No 3, 175-200.

Sunartadirdja, M.A., Lehmann, H. 1960. "Der tropische Karst von Maros und Nord-Bone in SW-Celebes". Z. Geomorph. Suppl., 2, 49-65.

Svenonius, F. 1880. "En egendomlig dalgång i nordligaste Jemtland". G.F.F. 5, 76- 82.

— 1910. "Bjurälfdalens karstlandskap i norra Jämtland". Sveriges Natur I, 73-80.

Svensson, H. 1963. "Ett dolinområde på Alvaret". Svensk Geogr. Årsb. 39, 101-110.

Sweeting, M.M. 1950. "Erosion cycles and limestone caverns in the Ingleborough District of Yorkshire". Geogr. J., 115, 63-78.

— 1958. "The karstlands of Jamaica". Geogr. J., 124, 184-199.

— 1960. "The caves of the Buchan area, Victoria, Australia". Z. Geomorph. Suppl. 2, 81-89.

— 1964. "Some factors in the absolute denudation of limestone terrains". Erdkunde 18, 92-95.

— 1965. "Denudation in limestone regions: a symposium. I. Introduction". Geogr. J. 131, 34-37.

— 1972. "Karst landforms". The Macmillan Press Ltd. London and Basingstoke. 362 sid.

— 1973. "Some problems of relict and fossil

karst in England" i "Neue Ergebnisse der Karstforschung in den Tropen und im Mittelmeerraum" utg. av A. Semmel och sammanställd av K-H. Pfeffer. Geogr. Z. Heft 32, 104-107.

Sweeting, M.M., Gerstenhauer, A. 1960. "Zur Frage der absoluten Geschwindigkeit der Kalkkorrosion in verschiedenen Klimaten". Z. Geomorph. Suppl. 2, 66-73.

Swinnerton, A.C. 1932. "Origin of limestones caverns". Bull. geol. Soc. Am. 43, 662-693.

Tell, L. 1955. "Underjordens vackra värld. Strövtåg i grottor". Stockholm. 155 sidor.

— 1961. "Erosionsförloppet med särskild hänsyn till Lummelundagrottorna". Ark. för sv. grottforskn. Nr 1.

— 1962. "Die Höhlentypen Schwedens". Ark. för sv. grottforskn. Nr 2.

— 1963. "Preliminär katalog över grottor i Sverige". Ark. för sv. grottforskn. Nr 3.

— 1964. "Speleologiska studier i svensk natur". Ark. för sv. grottforskn. Nr 4.

— 1965. "Några grottor i Östergötland". Ark. för sv. grottforskn. Nr 5.

— 1966. "Supplement nr 1 till Grottor i Sverige". Ark. för sv. Grottforskn. Nr 6.

— 1968. "Utmaning till Småland". Ark. för sv. grottforskn. Nr 8.

— 1969. "Urbergsgrottor". Ark. för sv. grottforskn. Nr 9.

— 1970. "Supplement nr 2 till Grottor i Sverige". Ark. för sv. grottforskn. Nr 10.

— 1971. "Handledning i svensk grottforskning". Ark. för sv. grottforskn. Nr 11.

— 1973. "Karstförekomster i Sverige". Ark. för sv. grottforskn. Nr 12.

Thrailkill, J.V. 1968. "Chemical and hydrological factors in the excavation of limestone caves". Bull. geol. Soc. Am., 79, 19-45.

Trewarta, G.T. 1968. "An introduction to climate" New York.

Trombe, F. 1952. "Traité de Spéléologie". Payot, Paris. 373 sidor.

Verstappen, H.Th. 1964. "Karst morphology of the Star Mountains (central New Guinea) and its relation to lithology and climate". Z. Geomorph., 8, 40-49.

— 1969. "The state of karst research in Indonesia". Studia Geogr. 5, Brno, 139-148.

Wall, J.R.D., Wilford, G.E. 1966. "A comparison of small-scale solution features on micro-granodiorite and limestone in West Sarawak, Malaysia". Z. Geomorph. N.F. 10, 90-94.

Waltham, A.C. 1970. "Cave development in the limestone of the Ingleborough district". Geogr. J. 136, 574-585.

— 1971. "Controlling factors in the development of caves". Trans. Cave Res. Grp. of Great Britain Vol. 13, No 2, 73-80.

Warwick, G.T. 1960. "The effect of knick-point recession on the watertable and associated features in limestone regions, with special reference to England and Wales". Z. Geomorph. Suppl. 2, 92-97.

— 1964. "Dry valleys in the southern Pennines, England". Erdkunde 18, 116-123.

Williams, J.E. 1949. "Chemical weathering at low temperatures". Geogr. Rev., 39, 129-135.

Williams, P.J. 1963. "An initial estimate of the speed of limestone solution in Country Clare, Ireland". Irish Geogr., 4, 432-441.

— 1969. "The geomorphic effects of ground water" i "Water, Earth and Man" av R.J. Chorley, London., 269-284.

— 1971. "Illustrating morphometric analyses of karst with examples from New Guinea". Z. Geomorph. N.F. 15, 40-61.

— 1972 a. "Morphometric analyses of polygonal karst in New Guinea". Bull. Geol. Soc. Am., 83, 761-796.

— 1972 b. "The analyses of spatial characteristics of karst terrains" i "Spatial analyses in geomorphology" av R.J. Chorley. Methuen. 135-163.

Wissman, H. 1954. "Der Karstder humiden heissen und sommerheissen Gebiete Ostasiens" Erdkunde 8, 122-130.

Zötl, J. 1957. "Neue Ergebnisse der Karsthydrologie". Erdkunde 11, 107-117.

— 1960. "Zur Frage der Niveaugebundenheit von Karstquellen und Höhlen". Z. Geomorph. Suppl. 2, 100-102.

— 1965. "Tasks and results of karst hydrology" i "Problems of the speleological research. Proc. Int. Speleol. Conf. Brno 1964". av O. Štelcl. 141-145.

Åkerman, J. 1972. "Speleoklimatologiska undersökningar i några sydsvenska grottor". Lunds Univ. Naturgeogr. Inst. Rapporter och Notiser 10, 80 sidor.

Ångström, A. 1938. "Lufttemperatur och luftanomalier i Sverige 1901-1930". Medd. S.M.H.A. Bd. 7, No 2. 22-26.

— 1958. "Sveriges klimat". G.L.A. Stockholm. 155 sidor.

XXVI. Gunhild Weimarck: Studier över landskapets förändring inom Lönsboda, Örkeneds socken, nordöstra Skåne. (1953).
XXVII. Ingemar Larsson: Structure and Landscape in Western Blekinge, Southeast Sweden. (1954).
XXVIII. Sven Godlund: Busstrafikens framväxt och funktion i de urbana influensfälten. (1954).
XXIX. Folke Lägnert: Syd- och mellansvenska växtföljder. Del I. De äldre brukningssystemens upplösning under 1800-talet. (1955).
XXX. Olof Ängeby: Toppkonstans, erosionsytor och passdalar i Jämtland och Tröndelag. (1955).
XXXI. Gunnar Johnsson: Glacialmorfologiska studier i södra Sverige. (1956).
XXXII. Folke Lägnert: Syd- och mellansvenska växtföljder. Del II. 1900-talet. (1956).
XXXIII. Olof Nordström: Befolkningsutveckling och arbetskraftsproblem i östra Småland 1800-1955. (1957).
XXXIV. Sven Godlund: Befolkning - regionsjukhus - resmöjligheter - regioner. (1958).
XXXV. Elis Pålsson: Gymnasiers rekrytering och lokalisering. (1958).
XXXVI. Harald Svensson: Glaciation och morfologi. En glacialgeografisk studie i ett tvärsnitt genom Skanderna mellan södra Helgelandskusten och Kultsjödalen. (1959).
XXXVII. Erik Ljungner: Nahuel Huapi. Ein geographischer Querschnitt durch die Anden in Patagonien. (1959).
XXXVIII. Nils Lewan: Om pendling mellan bostad och arbetsplats. En undersökning med material från sydvästra Skåne. (1960).
XXXIX. Åke Mattsson: Morphologische Studien in Südschweden und auf Bornholm über die nichtglaziale Formenwelt der Felsenskulptur. (1962).
XL. Stig Nordbeck: Framställning av kartor med hjälp av siffermaskiner. (1964).
XLI. Olof Nordström: Svensk glasindustri 1550-1960. (1962).
XLII. Jan Davidsson: Littoral Processes and Morphology on Scanian Flatcoasts. (1963).
XLIII. Martin Markgren: Detaljmorfologiska studier i fast berg och blockmaterial. Geomorfologisk studie inom Fennoskandia med Skåne. (1962-1963).
XLIV. Martin Markgren: Geomorphological Studies in Fennoscandia. II. Chute. Slopes in Northern Fennoscandia. A. Regional Studies. (1964).
XLV. Martin Markgren: Geomorphological Studies in Fennoscandia. II. Chute. Slopes in Northern Fennoscandia. B. Systematic Studies. (1964).
XLVI. Lennart Améen: Stadsbebyggelse och domänstruktur. (1964).
XLVII. Arvid Bergdahl: Det glaciala landskapet. (1961).
XLVIII. Olof Nordström-Solveig Mårtensson: Turism på Öland. (1966).
XLIX Jan O. Mattsson: The Temperature Climate of Potato Crops.(1966).
L. Nils Lewan: Landsbebyggelse i förvandling. (1967).
LI. Gösta Nordholm: Skånes äldre ekonomiska geografi. (1967).
LII. Sven Godlund-Torsten Hägerstrand-Bengt Svanström: Samhällsutvecklingen och samhällsplaneringen. (1967).
LIII. Tor Fr. Rasmussen: Storbyutvikling og arbeidsreiser. (1966).
LIV. Erig Fagerlund-Harald Svensson- Sven Lindqvist m.fl.: Infrarödtermografi. Principer och naturgeografiska tillämpningar. (1967).
LV. Lars Eldblom: Structure foncière, organisation et structure sociale. (1968).
LVI. Knut Norborg: Jordbruksbefolkningen i Sverige. (1968).

LVII. Gunhild Weimark: Ulfshult. (1968).
LVIII. Rune Järvenstedt-Sven Lindqvist-Jan O. Mattsson m.fl.: Televisionsystem i naturgeografisk forskning. (1968).
LIX. Arne Jakobsson: Omflyttningen i Sverige 1950-1960. (1969).
LX. Åke Hillefors: Västsveriges glaciala historia och morfologi. (1969).
LXI. Sven Lindqvist: Bebyggelseklimatiska studier. (1970).
LXII. Torsten Hägerstrand, Gunnar Törnqvist m.fl.: Urbaniseringen i Sverige (SOU 1970:14).
LXIII. Bengt Sahlberg: Interregionala kontaktmönster. Personkontakter inom svenskt näringsliv - en flygpassagerarstudie. (1970).
LXIV. Björn Hedberg: Kontaktsystem inom svenskt näringsliv. En studie av organisationers externa personkontakter. (1970).
LXV. Mats G. Engström: Regional arbetsfördelning. Nya drag i förvärvsarbetets geografiska organisation i Sverige. (1970).
LXVI. Torsten Persson: Geomorphological Studies in the South-Swedish Highlands. (1972).
LXVII. Dewitt Davis Jr: A factoral ecology of Malmö 1965. The social geography of a city. (1972).
LXVIII. Zoltan Petery: Studier i svensk regionplanering. Regionplanering enligt byggnadslagen i mindre regioner. (1972).
LXIX. Tommy Book: Stadsplan och järnväg i Norden. (1974).
LXX. Hans Abrahamson: Studier i jordbrukets omstrukturering. (1974).
LXXI. Christer Persson: Kontaktarbete och framtida lokaliseringsförändringar. Modellstudier med tillämpning på statlig förvaltning. (1974).
LXXII. Ulf Helldén: Karst. En studie av Artfjällets karstområde samt jämförande korrosionsanalyser från Västspetsbergen och Tjeckoslovakien. (1974).

AV-Centralen, Lund 1974